

CURSO EXTENSOMETRIA



Prof. Edison da Rosa

Prof. Carlos Rodrigo de Melo Roesler

Fevereiro 2012 / GRANTE / EMC / CTC / UFSC

CURSO EXTENSOMETRIA



PROGRAMAÇÃO DO CURSO

1 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

3 - USO DE EXTENSÔMETROS EM TRANSDUTORES

4 - USO DE SG NA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

5 - INSTRUMENTAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

6 - APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

ANEXO

CURSO EXTENSOMETRIA



AULA 1 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

Definição de deformação

Deformação nominal, de engenharia

Deformação real

Histórico e princípios da extensometria

Tipos de extensômetros

Medida de alongamento, $\Delta \ell$

Extensômetros mecânicos

Extensômetros óticos

Medida de deformação. $d\ell$

Extensômetros elétricos

Extensômetros piezoresistivos

Extensômetros óticos

Extensômetros "surface acoustic waves"

Outros tipos de extensômetros

Tipos de extensômetros de resistência elétrica

Metálico de fio

Metálico foil

Semicondutor

Depositado

Micro / nano fabricado

Aplicações

Análise de tensões

Transdutores de carga

Transdutores de deslocamento

Outras aplicações



AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

Resistência elétrica e resistividade

Definição

Lei de Ohm

Efeitos sobre a resistência elétrica

Exemplo para o cobre

Dados de resistividade TCR e TCL para alguns materiais

Medida de resistência a dois fios

Medida de resistência a quatro fios, Kelvin

Circuitos R série, paralelo

Divisor de tensão

Extensômetro elétrico de resistência variável

Princípio de funcionamento

Modelo fabricado

Tipos de SG elétricos

Características elétricas e mecânicas de um SG

Data sheets de extensômetros comerciais

Efeito da temperatura

SG de Constantan aplicado sobre aço

Outros casos, Ni, Balco

Ponte de Wheatstone - Formulação

Equação geral da PW

Linearização para pequenas perturbações

Comparação para 1/4 e 1/2 ponte

Ponte de Wheatstone - Aplicação

Tipos de PW, 1/4, 1/2, 1/4 + 1/4, 4/4

Compensação de temperatura

Dummy

Auto compensação

Compensação campo magnético

Capacidade de dissipação térmica

Circuitos de zeragem

Verificação da ponte



AULA 3 - USO DE EXTENSÔMETROS EM TRANSDUTORES

Requisitos para transdutores

 Materiais para transdutores

 Tipos de SG

 Tipos de adesivos

 Fiação

 Calibração

Transdutores de carga, célula de carga

 Requisitos específicos

 Tipos de célula de carga, geometria

 Tração / compressão

 Flexão

 Cisalhamento

 Torção

Transdutores de deslocamento, clip gages

 Requisitos específicos

 Formulação

 Clip gage axial

 Clip gage diametral

Circuitos de compensação

 Compensação de zero

 Compensação de spam

Tipos de célula de carga, circuito da ponte

 Tração / compressão

 Flexão

 Cisalhamento

 Torção

 Célula de carga de seis eixos

Outros tipos de transdutores

 Aceleração

 Temperatura

 Fadiga



AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

Campo de tensões e deformações

Solução elástica para deformações

Solução elástica para tensões

Círculo de Mohr para tensão e deformação

Estado plano de tensões

Solução para deformações

Solução para tensões

Casos de tensões ou deformações proporcionais

Deformações em direções arbitrárias

Formulação geral

Direção de deformação zero, estado uniaxial biaxial

Estudo de casos

Formulação para $1/4$, $1/2$, $1/4 + 1/4$, $4/4$

Tração, flexão

Cisalhamento, torção

Efeito de concentração de tensão

Definição elástica

Gradiente de tensões

Solução no campo plástico

Análise de rosetas

Roseta 0-90 e roseta ± 45

Roseta 0-45-90 e roseta 0-60-120

Estudo de tensões residuais

Método do furo cego

Controle de qualidade

Ponte de Wheatstone na análise de tensões

Formulação $1/4$ de ponte a três fios

Calibração dos extensômetros



AULA 5 - INSTRUMENTAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

Instrumentação

- Configuração geral de um SCAD
- Circuitos de zeragem
- Amplificação
- Multiplexação
- Conversão AD
- Padrões de comunicação

Sistemas comerciais de condicionamento e aquisição

- Controles por hardware
- Tipos de sistemas
- Controle por software
- Tipos de sistemas

Análise de erro

- Fiação a 2, 3, 4 e 6 fios
- Alimentação
- Outros efeitos
- Metodologia de análise de erros

Alimentação da ponte

- Corrente DC, AC, pulsada
- Ponte alimentada por fonte de voltagem, corrente
- Dissipação térmica do SG.

Outras formas de instrumentação de SG

- Circuito potenciométrico
- Anderson loop
- Outros



AULA 6 - APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

Planejamento do trabalho

- Objetivos do ensaio de AExT
- Objetivos do transdutor
- Número de pontos e tipo de informação
- Escolha do local e orientação do SG

Seleção do SG e da instrumentação

- Escolha do tipo de SG para uma dada aplicação
- Escolha das características da ponte
- Escolha da fiação

Aplicação de SG

- Escolha do local e orientação do SG
- Preparo do SG para aplicação
- Preparo do local de aplicação
- Preparo da fiação
- Aplicação do SG
- Proteção da aplicação
- Verificação da qualidade da aplicação

Casos especiais

- Força centrífuga
 - Ambiente agressivo
-

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 1 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

Definição de deformação

Deformação nominal, de engenharia

Deformação real

Histórico e princípios da extensometria

Tipos de extensômetros

Medida de alongamento, $\Delta \ell$

Extensômetros mecânicos

Extensômetros óticos

Medida de deformação, $d\ell$

Extensômetros elétricos

Extensômetros piezoresistivos

Extensômetros óticos

Extensômetros "surface acoustic waves"

Outros tipos de extensômetros

Tipos de extensômetros de resistência elétrica

Metálico de fio

Metálico foil

Semicondutor

Depositado

Micro / nano fabricado

Aplicações

Análise de tensões

Transdutores de carga

Transdutores de deslocamento

Outras aplicações

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 1 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

1.1 – DEFINIÇÃO DE DEFORMAÇÃO

Definição da teoria de pequenos deslocamentos

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] ;$$

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{2} 2 \frac{\partial u_x}{\partial x} = \frac{\partial u_x}{\partial x} ;$$

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x} ; \quad \varepsilon_{yy} = \varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y} ; \quad \varepsilon_{zz} = \varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z}$$

Deformação cisalhante

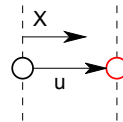
$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right] = \frac{1}{2} \gamma_{xy}$$

CURSO EXTENSOMETRIA

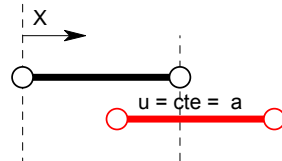
AULA 1 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

1.1 – DEFINIÇÃO DE DEFORMAÇÃO

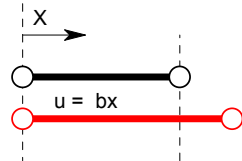
Caso uniaxial para a teoria de pequenos deslocamentos



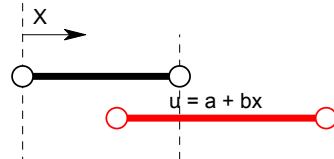
Deslocamento de um ponto



Deslocamento de corpo rígido



Deslocamento proporcional à posição



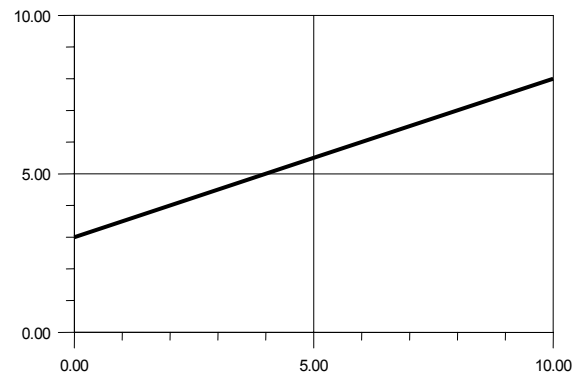
Deslocamento geral

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 1 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

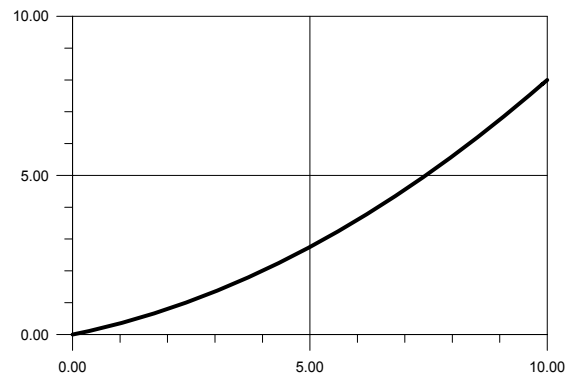
1.1 – DEFINIÇÃO DE DEFORMAÇÃO

Campo de deformação uniforme e não uniforme.



$$u_x = a + b \cdot x$$

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x} = b$$



$$u_x = 0.30 \cdot x + 0.05 \cdot x^2 \quad [10^{-3}]$$

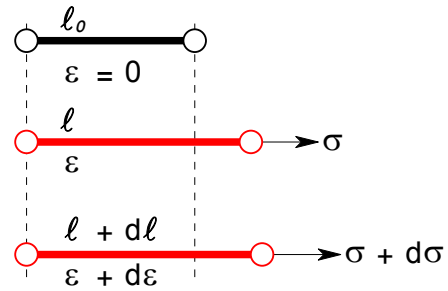
$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x} = 0.30 + 0.10 \cdot x \quad [10^{-3}]$$

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 1 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

1.1 – DEFINIÇÃO DE DEFORMAÇÃO

Definição para o caso uniaxial:



Deformação nominal, de engenharia,

$$d\varepsilon_0 = \frac{d\ell}{\ell_0}$$

Deformação real, natural,

$$d\varepsilon = \frac{d\ell}{\ell}$$

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 1 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

1.1 – DEFINIÇÃO DE DEFORMAÇÃO

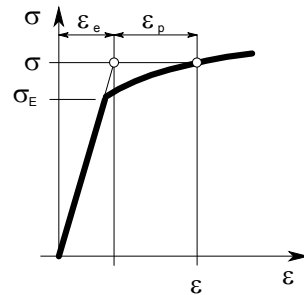
Tipos de deformação:

Deformação mecânica, ε_M :

Dependente do estado de tensões no material.

A informação básica é obtida pelo ensaio de tração e pelas relações constitutivas, $\sigma = \sigma(\varepsilon)$.

A deformação mecânica é formada por uma parcela elástica, recuperável, e pela parcela plástica, permanente.



$$\varepsilon_M = \varepsilon_e + \varepsilon_p$$

Deformação térmica, ε_T :

A deformação térmica é consequência da variação de dimensões com a mudança da temperatura.

Depende do coeficiente de dilatação térmica e da variação de temperatura:

$$\varepsilon_T = \alpha_L \cdot \Delta T$$

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 1 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

1.1 – DEFINIÇÃO DE DEFORMAÇÃO

Tipos de deformação:

Deformação volumétrica, swelling, ε_V .

Em certos casos muito particulares ocorre uma variação de volume do material, decorrente de algum fenômeno físico ou químico. É o que ocorre com polímeros com a perda ou absorção de umidade, ou com materiais metálicos quando submetidos ao bombardeio de neutrons.

Deformação total, é a soma de todos os tipos de deformação que o material sofre. Se o corpo for totalmente livre para se deformar, as deformações térmicas, ou volumétricas, não geram tensões no material, Caso estas deformações sejam parcial ou totalmente impedidas, deformações mecânicas surgem para compensar esta restrição, gerando, portanto, tensões.

$$\varepsilon = \varepsilon_M + \varepsilon_T + \varepsilon_V$$

$$\varepsilon_M = \varepsilon_e + \varepsilon_p$$

$$\varepsilon_{ex} = \frac{\sigma_x}{E}; \text{ estado uniaxial de tensões.}$$

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 1 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

1.1 – DEFINIÇÃO DE DEFORMAÇÃO

Deformação nominal, de engenharia,
Para pequenos deslocamentos:

$$d\varepsilon_0 = \frac{d\ell}{\ell_0}; \quad \varepsilon_0 = \int_{\ell_0}^{\ell} d\varepsilon_0 = \frac{\ell - \ell_0}{\ell_0}$$

$$\varepsilon_0 = \frac{\Delta\ell}{\ell_0}$$

Deformação real, natural,
Para grandes deslocamentos:

$$d\varepsilon = \frac{d\ell}{\ell}; \quad \varepsilon = \int_{\ell_0}^{\ell} d\varepsilon = \ln(\ell/\ell_0)$$

$$\varepsilon = \ln(\ell/\ell_0)$$

Deformação real, natural,
Deformação volumétrica:

$$de = \frac{dV}{V}; \quad e = \ln \frac{V}{V_0}; \quad e = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$$

CURSO EXTENSOMETRIA

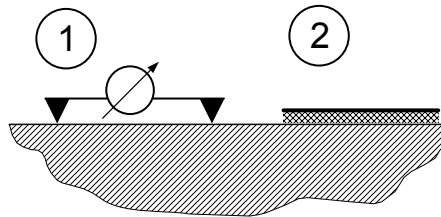
AULA 1 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

1.2 – HISTÓRICO E PRINCÍPIOS DA EXTENSOMETRIA

Tipos de extensômetros

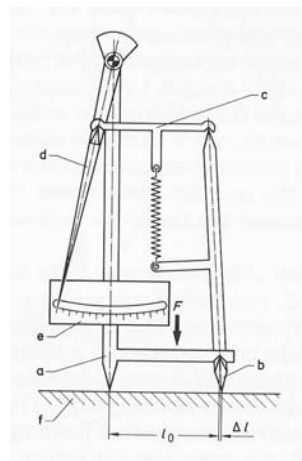
Tipo 1 - Baseados na medida do deslocamento relativo entre dois pontos, Δl .

Tipo 2 - Baseados na deformação de um elemento sensível, aderente à superfície do material, $d\ell$.



Medida de alongamento

Extensômetros mecânicos



CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 1 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

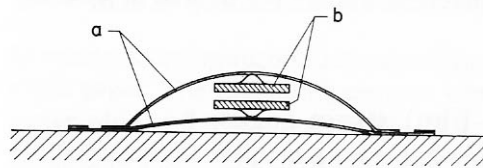
1.2 – HISTÓRICO E PRINCÍPIOS DA EXTENSOMETRIA

Medida de alongamento

Extensômetros óticos

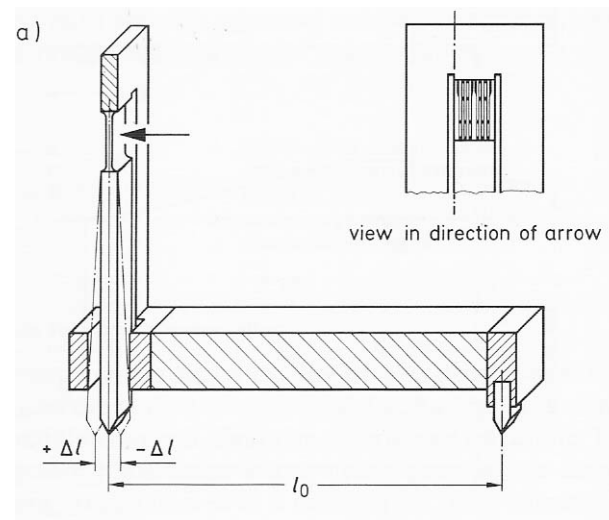
Extensômetros pneumáticos

Extensômetros capacitivos



Extensômetros indutivos

Extensômetros de fio vibrante



CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 1 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

1.2 – HISTÓRICO E PRINCÍPIOS DA EXTENSOMETRIA

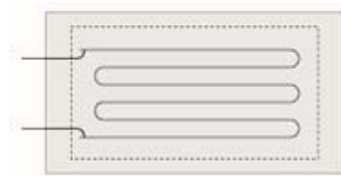
Medida de deformação

Extensômetros elétricos

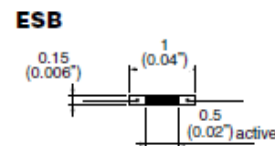
Edward Simmons, Caltec, e Arthur Ruges, MIT, 1938 – SR4.

Peter Scott-Jackson, Saunders Roe (AVRO), UK, 1952.

Efeito Thomson, 1856.



Extensômetros piezo resistivos



Comparação de tecnologias para células de carga:

Technology	Strain gage	Piezoelectric
Sensitivity	0.003 mV/ $\mu\epsilon$	80 pC/ $\mu\epsilon$
Discrimination threshold	0.01 $\mu\epsilon$	0.00001 $\mu\epsilon$
Meas. range/discrim. threshold	1 000 000	1 000 000 000
Drift	< 0.2 $\mu\text{V/V}$ in 48 h	< 4320 pC in 48 h
Volume	100 %	< 5 %
Principle of measurement	absolute	relative
Linearity	0.05 %	1 %
Connection	min. 4-wire	2-wire

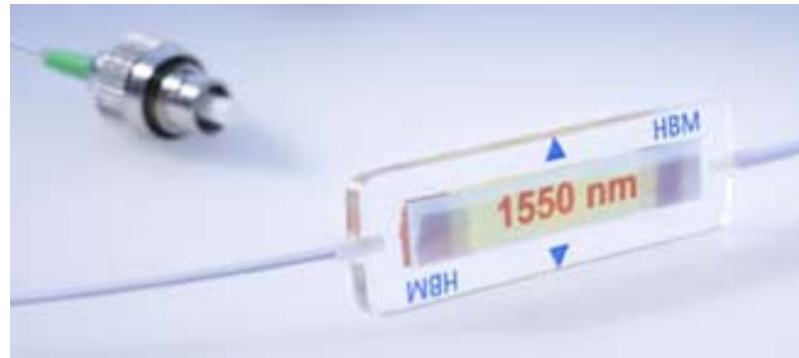
CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 1 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

1.2 – HISTÓRICO E PRINCÍPIOS DA EXTENSOMETRIA

Outros tipos de extensômetros

Extensômetros óticos



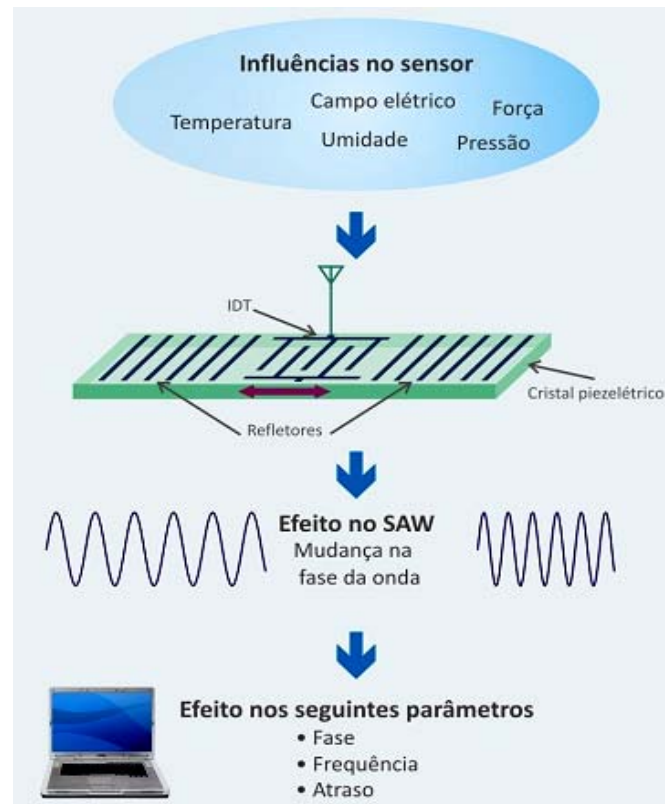
CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 1 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

1.2 – HISTÓRICO E PRINCÍPIOS DA EXTENSOMETRIA

Outros tipos de extensômetros

Extensômetros "surface acoustic waves", RFID



CURSO EXTENSOMETRIA

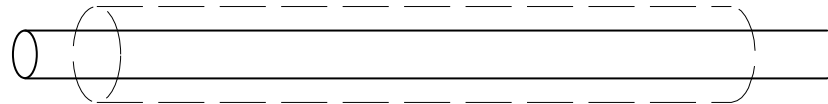
AULA 1 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

1.3 – TIPOS DE EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

Princípio de operação

Charles Wheatstone, 1843;

Efeito Thomson, 1856.



$$R = \frac{\rho \ell}{A}; \quad \frac{dR}{R} = \frac{d\ell}{\ell} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho}$$

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon (1 + 2\nu) + \frac{d\rho}{\rho}$$

Tipos de extensômetros de resistência elétrica:

Quanto ao processo de fabricação:

Metálico de fio;

Metálico de lâmina;

Semi condutor, piezo resistivo.

Quanto ao número de eixos:

Uniaxiais;

Biaxiais;

Triaxiais.

Quanto à aplicação

Análise de tensões;

Transdutores;

Em alta temperatura;

Medida de tensão residual.

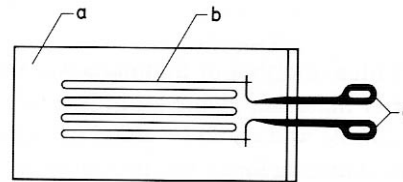
CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 1 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

1.3 – TIPOS DE EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

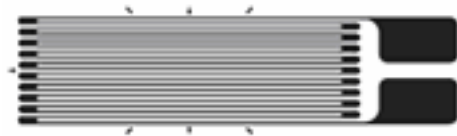
Metálico de fio

Fabricado com um fio enrolado para formar a grade e colado sobre a base. O fio da grade é soldado aos terminais. Considerando por exemplo 240 mm de fio de constantan, para formar um extensômetro de 120 Ω , o fio deve ter uma resistência de 500 Ω por metro, o que para o constantan, significa um fio AWG 44, com 0,0502 mm de diâmetro. Estes extensômetros não têm valores de resistência muito elevados, sendo usuais valores de 55 Ω e 60 Ω .



Metálico de lâmina, foil

Uma lâmina metálica muito fina é aplicada sobre a base. Por processo fotográfico a grade é marcada e a parte indesejada é removida por ataque químico. A espessura típica é de 0,005 mm para a lâmina e 0,040 mm para a base polimérica. Esta técnica permite gerar extensômetros com 500 Ω ou mais.



CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 1 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

1.3 – TIPOS DE EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

Exemplo de aplicação:

Extensômetro tipo LY41B-10/120;

Grade com 10 mm de comprimento;

Resistência elétrica de 120 Ω ;

Grade formada por 14 vias;

Filme de constantan de 0,005 mm de espessura.

$$R = \frac{\rho \ell}{A}; \quad A = \frac{\rho \ell}{R}$$

$$\ell = 140 \text{ mm}; \quad \rho = 0,48 \Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$$

$$A = \frac{0,48 \cdot 0,14}{120} = 0,00056 \text{ mm}^2$$

Largura das trilhas portanto 0,112 mm.

CURSO EXTENSOMETRIA

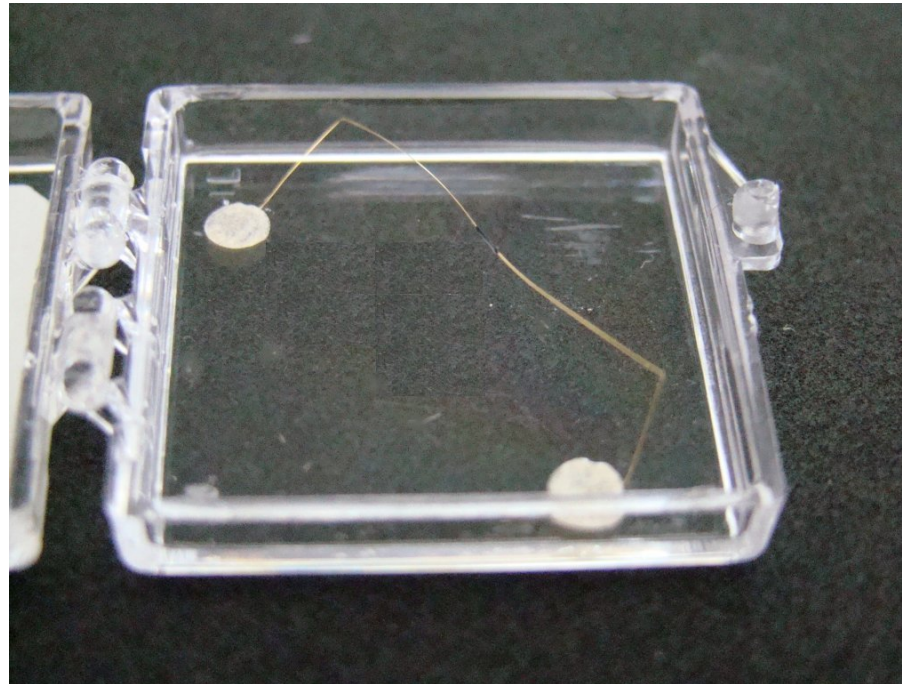
AULA 1 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

1.3 – TIPOS DE EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

Semi condutor

Tem como vantagem uma grande sensibilidade, da ordem de 50 vezes mais do que um extensômetro metálico.

Porém a sensibilidade à temperatura é também muito elevada, demandando extremo cuidado neste aspecto.



CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 1 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

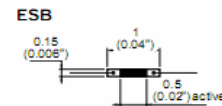
1.3 – TIPOS DE EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

Semi condutor

ESB Strain Gages

Semiconductor - Bar Shaped

ESB-020



Dim: mm (inches)

ESB Series

MODELS	SHAPE	R	TCR	GF - GAGE	TCGF
		RESISTANCE nom.	/100°F (/55°C) nom.(Note 3)	FACTOR nom.	/100°F (/55°C) nom. (Note 3)
ESB-020-350	Bar	350 Ω	+22%	+155	-18%
ESB-020-500	Bar	500 Ω	+22%	+155	-18%

QUANTITY OF GAGES IN PACK:	Matched Sets of 4: 4	Unmatched sets of 10: 10
MATCHING (R):	Matched Sets of 4: R within ±2% of each other	Unmatched sets of 10: R within ±10% of each other
R nom., 20°C (70°F):	Matched Sets of 4: Resistance in ohms, ±10%	Unmatched sets of 10: Resistance in ohms, ±20%
GF nom., 20°C (70°F):	Gage Factor, $\frac{\Delta R/R}{\Delta L/L}$, ±5%.	
TCR nom. (Note 3):	Thermal Coefficient of Resistance, $\frac{\Delta R/R}{100^\circ F}$, ±3%, 70°F to 170° (20°C to 77°C).	
TCGF nom. (Note 3):	Thermal Coefficient of Gage Factor, $\frac{\Delta GF}{100^\circ F}$, ±3%, 70°F to 170°F (20°C to 77°C).	
GAGE TYPE:	P-Type Silicon.	
STRAIN LEVEL (Note 1):	0-1000μstrain recommended, 0-3000μstrain maximum.	
WATTAGE RATING (per gage):	0-25milliwatt recommended, 50milliwatt maximum. Watts=(Voltage on Gage) ² /(Gage Resistance).	
TEMPERATURE RANGE:	-100°F to +600°F (-73°C to 315°C).	
LEAD WIRES:	Gold, 0.0015" diameter x 0.25" length min. (0.038mm dia. x 6.35mm).	
YOUNG'S MODULUS:	E=27x10 ⁴ psi (1.9x10 ⁴ kg/cm ²).	
SENSITIVITY, Vo (Note 2):	Voltage Out=1/4(No. Active Arms) (Gage Factor)(Strain Level) (Excitation Voltage).	
	Example: Fully active 4 Arm Bridge, GF=130, 500μstrain, 5V Exc. Vo=1/4 (4) (130) (500x10 ⁻⁶) (5V)=325mV.	
BONDING:	Apply thin Epoxy precoat for electrical isolation. Then apply bonding coat to substrate, place gage (handling by its leads only) on wet epoxy and align. Gage is held in position by surface tension only, DO NOT apply weights or force, as this may damage the gage. Micro Measurements M-Bond 610 or equivalents are recommended.	

CURSO EXTENSOMETRIA

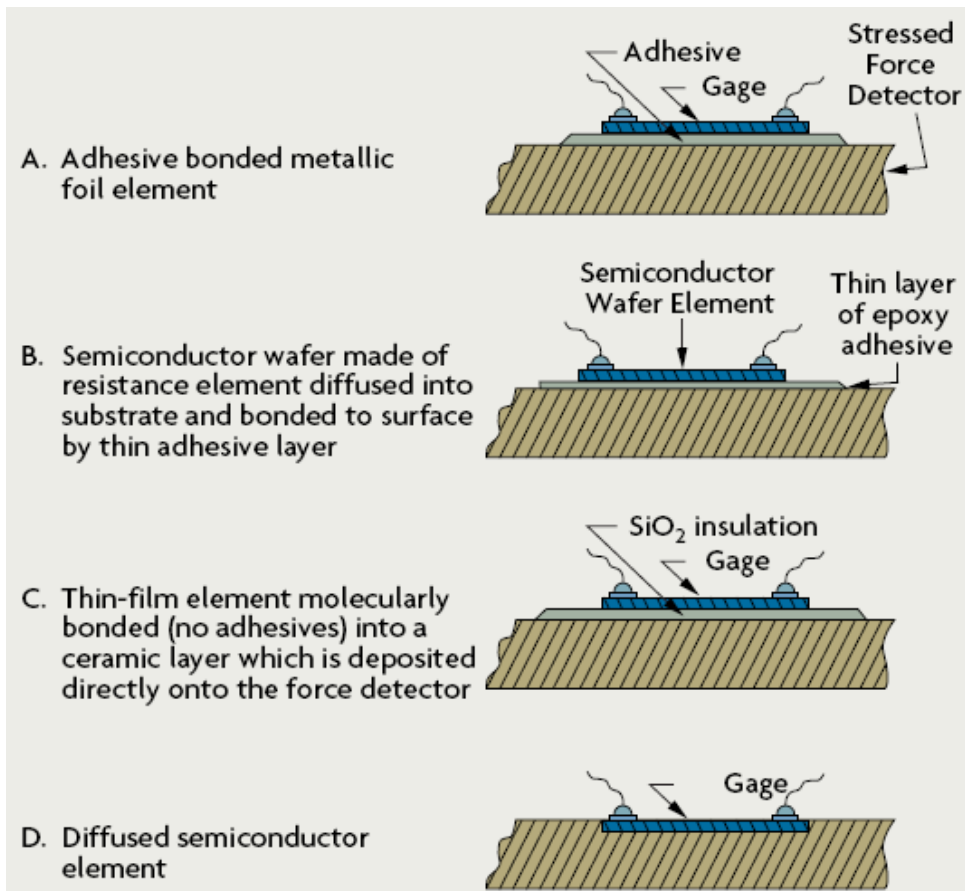
AULA 1 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

1.3 – TIPOS DE EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

Outros

Depositado

Micro / nano fabricado

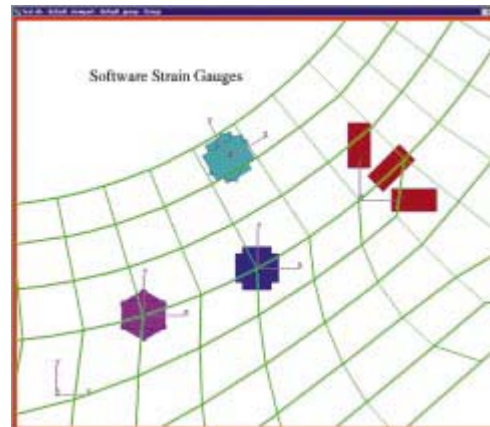


CURSO EXTENSOMETRIA

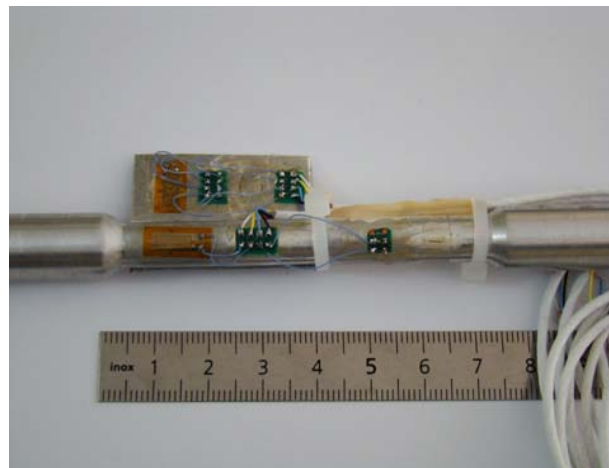
AULA 1 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

1.4 – APLICAÇÕES

Análise de tensões



Ensaio mecânicos

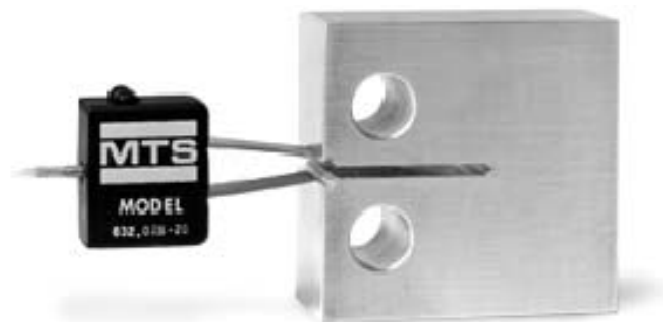


CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 1 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

1.4 – APLICAÇÕES

Transdutor de deslocamento



CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 1 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

1.4 – APLICAÇÕES

Acompanhamento de ensaio destrutivo

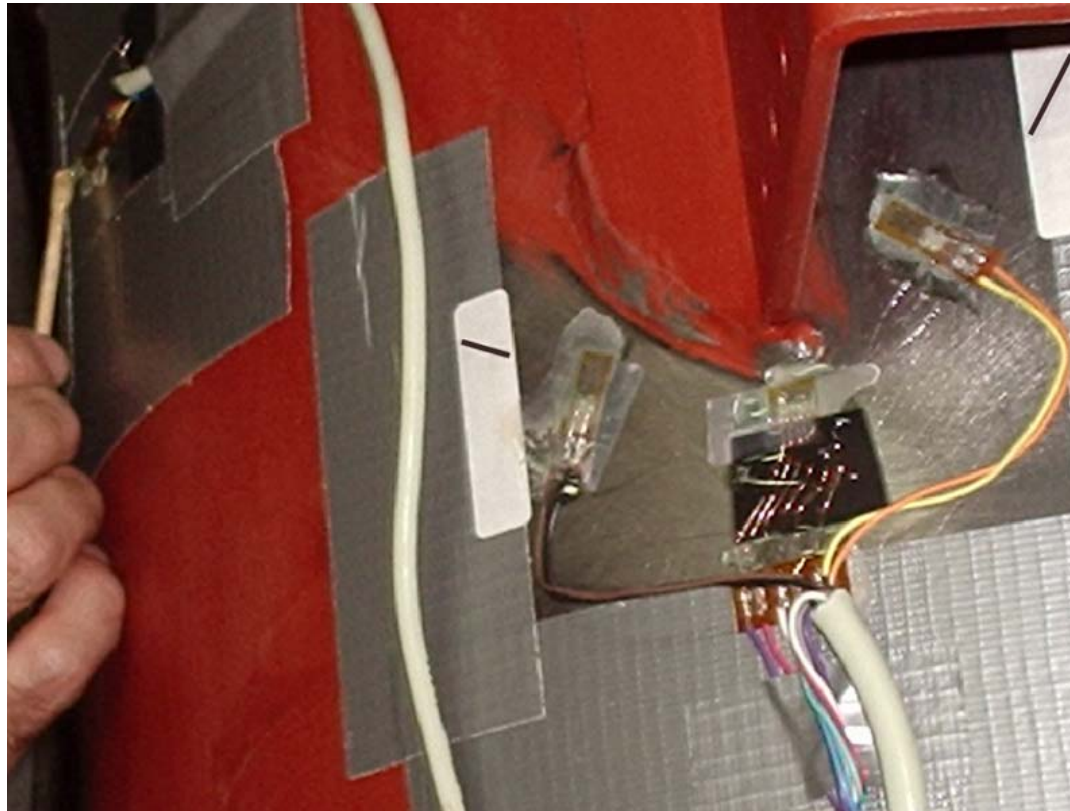


CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 1 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

1.4 – APLICAÇÕES

Análise de tensões



Ensaio em reservatório pressurizado, com extensômetros montados na direção perpendicular à de propagação de trincas verificadas em campo, forte indicativo da direção das tensões principais.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 1 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

1.4 – APLICAÇÕES

Análise de tensões



CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 1 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

1.4 – APLICAÇÕES

Transdutores de carga



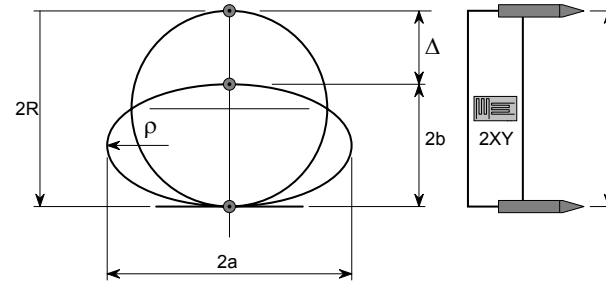
CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 1 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

1.4 – APLICAÇÕES

Transdutor de deslocamento

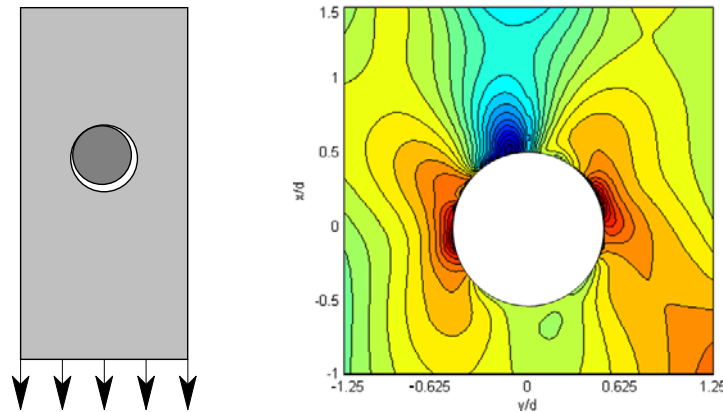
Considerando geometria elíptica:



$$\varepsilon = \frac{h}{2R} \frac{6x - x^2}{4 - 4x + x^2} ; \quad x = \frac{\Delta}{R}$$



Acoplamento ESA com FEA



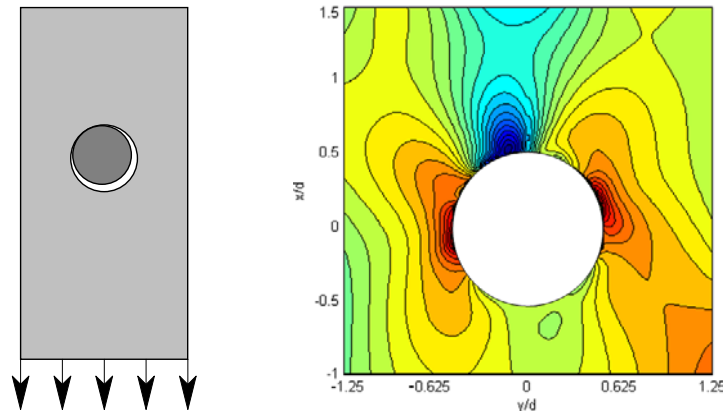
Ensaio de foto elasticidade mostra que o carregamento aplicado não é perfeitamente simétrico, fato não considerado no modelo numérico.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 1 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

1.4 – APLICAÇÕES o

Acoplamento ESA com FEA



Ensaio indica condições de contorno não simétricas.
Corrigir o modelo de elementos finitos.

FEA simula o ensaio, análise de sensibilidade a possíveis problemas.
Ganho de know-how, onde medir, o que medir.

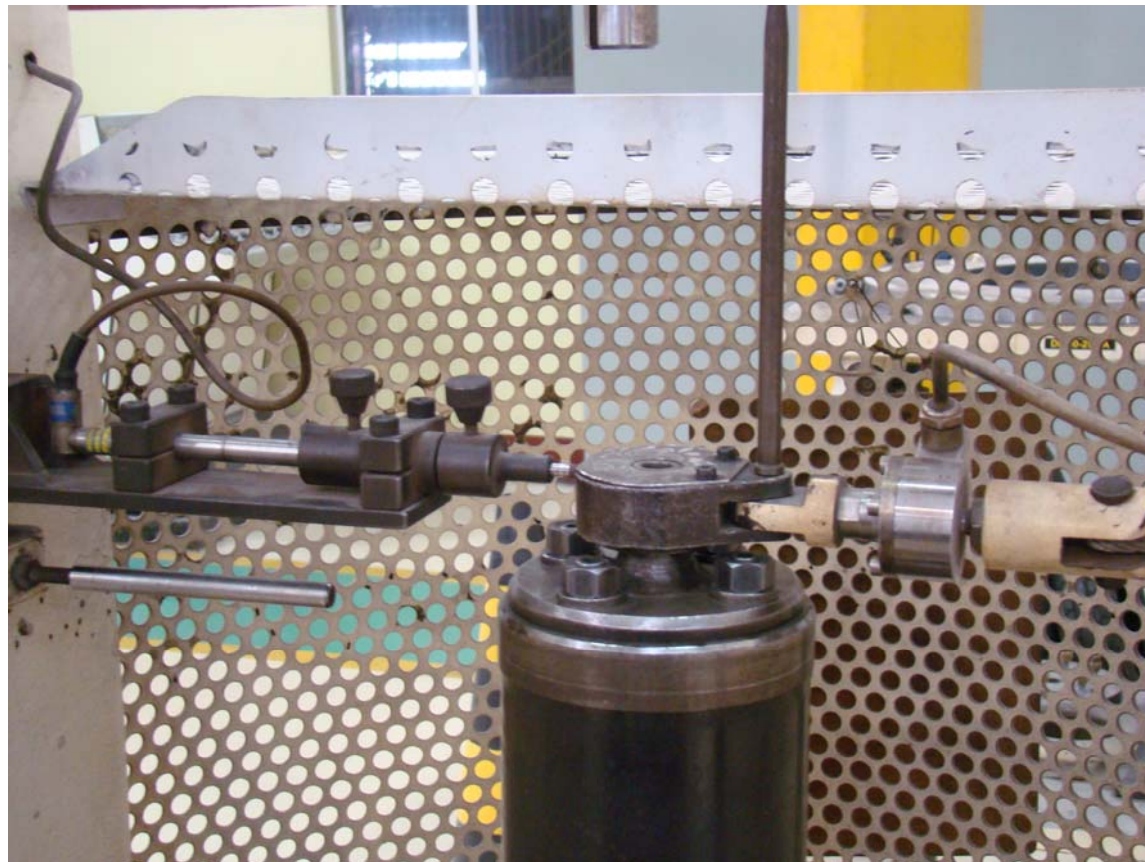
ESA retorna dados para a FEA, aprimora o modelo, mais próximo da realidade.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 1 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

1.4 – APLICAÇÕES

Outras aplicações



CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 1 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

1.4 – APLICAÇÕES

Outras aplicações



CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 1 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

1.4 – APLICAÇÕES

Outras aplicações



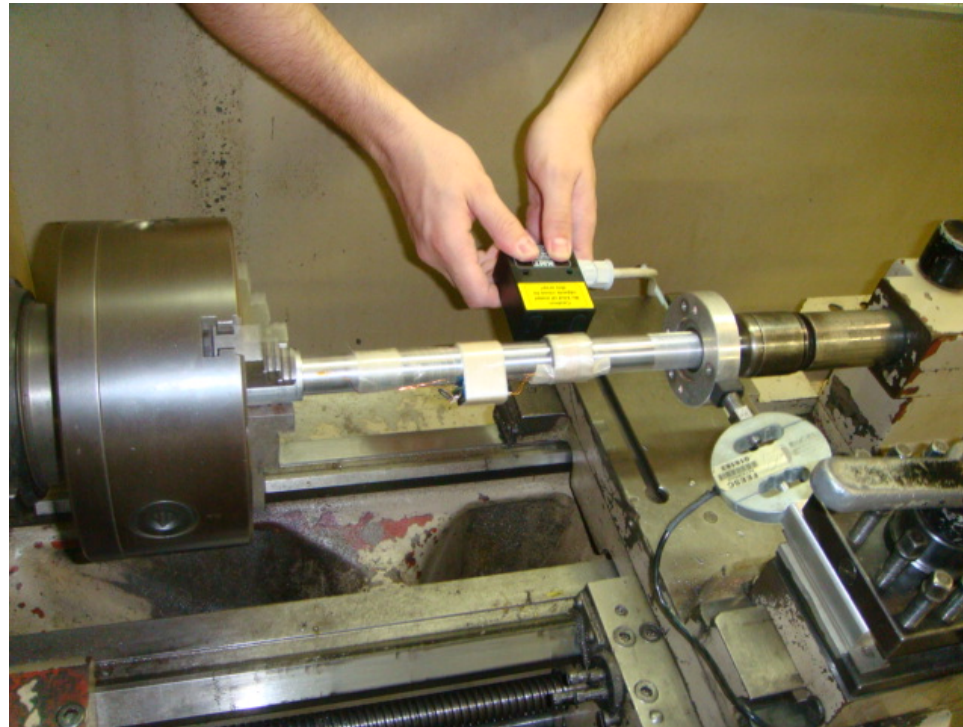
Protótipo de homologação do EMB 190 teve uma instrumentação com mais de 10^4 extensômetros e milhares de outros sensores.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 1 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

1.4 – APLICAÇÕES

Outras aplicações



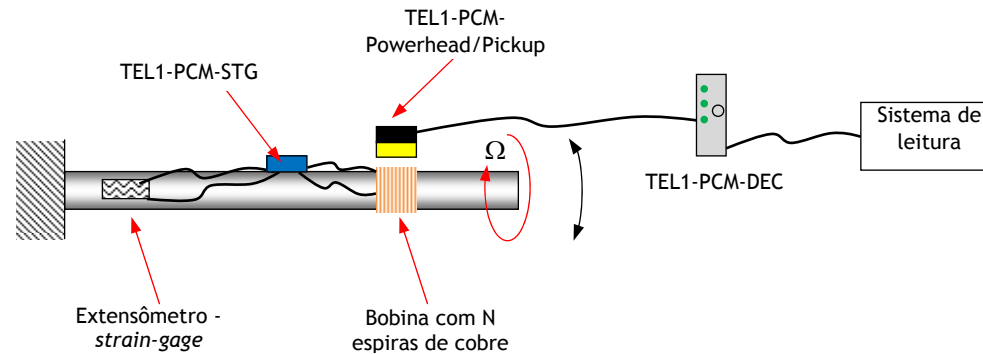
Ensaio de verificação de instrumentação de SG para medida sem contato, com pickup e bobina de indução.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 1 – PRINCÍPIOS DE EXTENSOMETRIA

1.4 – APLICAÇÕES

Outras aplicações



Instrumentação de SG, quarto de ponte ou meia ponte, para medida sem fio, com pickup e bobina de indução.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

Resistência elétrica e resistividade

Definição

Lei de Ohm

Efeitos sobre a resistência elétrica

Dados de resistividade TCR e TCL para alguns materiais

Medida de resistência a dois fios

Medida de resistência a quatro fios, Kelvin

Circuitos R série, paralelo

Divisor de tensão

Extensômetro elétrico de resistência variável

Princípio de funcionamento

Modelos fabricados

Tipos de SG elétricos

Características elétricas e mecânicas de um SG

Data sheet de extensômetros comerciais

Efeito da temperatura

Ponte de Wheatstone - Formulação

Equação geral da PW

Linearização para pequenas perturbações

Comparação para 1/4 e 1/2 ponte

Ponte de Wheatstone - Aplicação

Tipos de PW, 1/4, 1/2, 1/4 + 1/4, 4/4

Compensação de temperatura

Dummy

Auto compensação

Compensação campo magnético

Capacidade de dissipação térmica

Circuitos de zeragem

Verificação da ponte

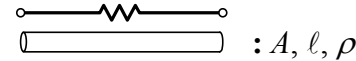
CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.1 – RESISTÊNCIA ELÉTRICA E RESISTIVIDADE

Resistividade:

$$R = \frac{\rho \ell}{A}; \quad R_o = \frac{\rho}{A}; \quad \rho = \frac{R A}{\ell}$$



Referência, cobre a 20°C, 100% IACS

$$\rho_{20} = 0,017241 \left[\Omega \text{ mm}^2 / \text{m} \right]$$

Lei de Ohm

$$R = \frac{V}{I}; \quad V = I \cdot R; \quad I = \frac{V}{R}$$

Efeitos sobre a resistência elétrica

Temperatura

$$\alpha_R = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial T} \approx \frac{1}{R} \frac{\Delta R}{\Delta T}$$

Deformação, equação básica da extensometria

$$\frac{\Delta R}{R} = k \varepsilon; \quad k: \text{Fator de sensibilidade, gage factor.}$$

$$k = \frac{1}{\varepsilon} \frac{\Delta R}{R} \quad ; \quad |k| \approx (2; 150)$$

Outros fatores incluem radiação, campo magnético, pressão hidrostática, intensidade luminosa (semicondutor), etc..

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.1 – RESISTÊNCIA ELÉTRICA E RESISTIVIDADE

Efeitos da temperatura sobre a resistência

$$\alpha_R = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial T} \approx \frac{1}{R} \frac{\Delta R}{\Delta T}$$

Exemplo para o cobre

$$\alpha_R = 0,003930 \quad [K^{-1}]$$

$$\rho_{20} = 0,017241 \quad ; \quad \alpha_R \approx 4000 \text{ ppm / K}$$

$$\Delta T = 50 \text{ K}, \quad \Delta R = 20\%$$

Fio típico para fiação de instrumentação tem bitola AWG 22, diâmetro 0,64 mm, com 0,0535 Ω /m de resistência elétrica.

Aplicação com 10 m de distância, logo $R = 1,07 \text{ } \Omega$, fio com 20 m.

Com 50°C de variação de temperatura, (7:00 AM / 1:00 PM), aumenta a resistência para $R = 1,28 \text{ } \Omega$, $\Delta R = 0,2103 \text{ } \Omega$.

Para um SG de 120 Ω e $k = 2$ isto corresponde a uma deformação aparente de 8,8E-4, ou seja, uma tensão aparente de 175 MPa!

Condutividade, inverso da resistividade, medida em Siemens.

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.1 – RESISTÊNCIA ELÉTRICA E RESISTIVIDADE

Efeito da temperatura sobre as dimensões, resistência elétrica e módulo de elasticidade.

$$\alpha_L = \frac{1}{L} \frac{\Delta L}{\Delta T} \quad \alpha_R = \frac{1}{R} \frac{\Delta R}{\Delta T} \quad \alpha_E = \frac{1}{E} \frac{\Delta E}{\Delta T}$$

Dados de resistividade, TCL, TCR e TCE para alguns materiais

MATERIAL	ρ [$\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$]	α_L - TCL [10E-6/K]	α_R - TCR [10E-6/K]	α_E - TCE [10E-6/K]
Aço		11,7	6000	- 230
Aço Inox		17,3		
Alumínio		23,5	4300	- 540
- Cobre	0,017	16,9	3930	
Platina	0,10	8,8	3850	
Níquel	0,11	13,2	5900	
Manganina	0,43	18,7	10	
Constantan	0,49	14,9	5	
NiCr 8020	1,30	13,2	100	

Efeitos sobre o TCR para o Constantan:

$$\alpha_R = 5 \text{ ppm/K}$$

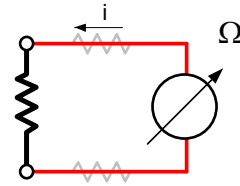
Com 50°C de variação de temperatura a resistência aumenta 0,025%, contra quase 20% para o caso do cobre, 800 vezes menos.

CURSO EXTENSOMETRIA

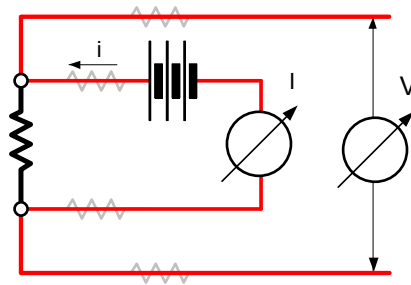
AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.1 – RESISTÊNCIA ELÉTRICA E RESISTIVIDADE

Medida de resistência a dois fios, ohmímetro, multímetro.



Medida de resistência a quatro fios, Kelvin, independente da resistência dos cabos e contatos.



$$R = \frac{V}{I}$$

Resistor padrão, alta precisão

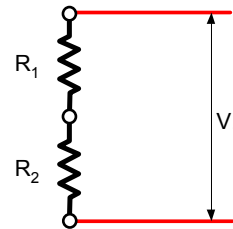


CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

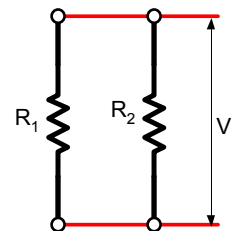
2.1 – RESISTÊNCIA ELÉTRICA E RESISTIVIDADE

Circuitos R em série



$$R = R_1 + R_2$$

Circuitos R em paralelo



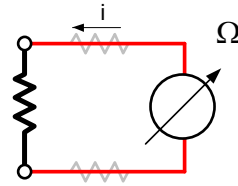
$$R^{-1} = R_1^{-1} + R_2^{-1} ; \quad R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.1 – RESISTÊNCIA ELÉTRICA E RESISTIVIDADE

Medida da resistência do SG com ohmímetro, multímetro.



Considerando um caso de análise experimental de tensões com uma resolução desejada de 1 MPa, medida por extensômetros de resistência de 120 Ω , para o caso do aço, vem:

$$\sigma = 1 \text{ MPa}; E = 2 \cdot 10^5 \text{ MPa} \Rightarrow \varepsilon = 5 \cdot 10^{-6}$$

$$\Delta R = R \cdot k \cdot \varepsilon \approx 0,001 \Omega$$

Evidente a dificuldade de realizar esta medida, sobre um valor nominal de 120 Ω , diferenciar entre 119,999, 120 e 120,001.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.1 – RESISTÊNCIA ELÉTRICA E RESISTIVIDADE

Medida de resistência, exemplo.

Extensômetro com $k = 2$ e $R_g = 120 \, \Omega$.

Resolução de 2 MPa, 10^{-5} em deformação no caso de aço.

Resolução de $0,0024 \, \Omega$.

Considerando uma fiação com cabos AWG 26, $0,134 \, \Omega/\text{m}$, com 4m de distância entre o extensômetro e o sistema de aquisição, resulta $1,07 \, \Omega$ de resistência da fiação, muito superior à resolução necessária.

Certas referências recomendam que a resistência elétrica dos cabos da fiação seja menor do que 1% da resistência do extensômetro. Neste exemplo esta recomendação está atendida.

No entanto, se ocorrer um aumento de temperatura de 20 K nos cabos, tal leva a uma variação da resistência nos mesmos de

$$\alpha_R = \frac{1}{R} \frac{\Delta R}{\Delta T} ; \quad \frac{\Delta R}{R} = 0,08 ; \quad \Delta R = 0,0856 \, \Omega$$

Esta variação corresponde a uma deformação aparente de $3,57 \cdot 10^{-4}$ e a uma tensão aparente de mais de 70 MPa.

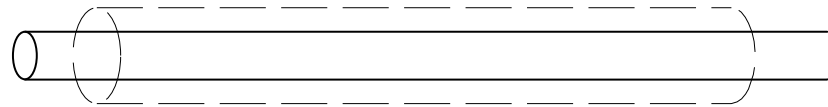
Assim a resistência elétrica dos cabos deve ser muito menor que 1% da resistência dos extensômetros.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.2 – EXTENSÔMETRO ELÉTRICO DE RESISTÊNCIA VARIÁVEL

Princípio de funcionamento



$$R = \frac{\rho \ell}{A}; \quad \frac{dR}{R} = \frac{d\ell}{\ell} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho}$$

$$\frac{dA}{A} = -2\nu \frac{d\ell}{\ell} + \nu^2 \left(\frac{d\ell}{\ell} \right)^2$$

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon (1 + 2\nu) + \frac{d\rho}{\rho}$$

Da equação básica da extensometria,

$$\frac{dR}{R} = k\varepsilon$$

logo,

$$k = (1 + 2\nu) + \frac{1}{\varepsilon} \frac{d\rho}{\rho}$$

Na faixa elástica os metais apresentam valores para o coeficiente de Poisson da ordem de 0,3. Como a maioria das ligas usadas na fabricação de extensômetros possui k igual ou maior que 2, a parcela da resistividade é significativa.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.2 – EXTENSÔMETRO ELÉTRICO DE RESISTÊNCIA VARIÁVEL

Principais materiais usados para a grade

DESIGNAÇÃO	Balco			
COMPOSIÇÃO	Ni 70%, Fe 30%			
PROPRIEDADES	k = -	$\rho = 0,20$	$\alpha_R = 4380$	$\rho_L = 15$
DESIGNAÇÃO	Constantan, Advance, Copel, Cupron			
COMPOSIÇÃO	Cu 55%, Ni 44%, Mn 1%			
PROPRIEDADES	k = 2,1	$\rho = 0,49$	$\alpha_R = 5; 20$	$\rho_L = 14,9$
DESIGNAÇÃO	Karma, Evanohm, Cromel R			
COMPOSIÇÃO	Cu 2,75%, Ni 74,5%, Cr 20%, Al 2,75%			
PROPRIEDADES	k = 2,0	$\rho = 1,33$	$\alpha_R = 5; 20$	$\rho_L = 14$
DESIGNAÇÃO	Manganina			
COMPOSIÇÃO	Cu 84%, Ni 4%, Mn 12%			
PROPRIEDADES	k = 0,47	$\rho = 0,482$	$\alpha_R = 15$	$\rho_L = 18,7$
DESIGNAÇÃO	Isoelastic			
COMPOSIÇÃO	Ni 36%, Cr 8%, Fe 55,5%, Mo 0,5%			
PROPRIEDADES	k = 3,2	$\rho = 1,15$	$\alpha_R = 470$	$\rho_L = -$
DESIGNAÇÃO	Nichrome 80, Nichrome V, Cromel A			
COMPOSIÇÃO	Ni 80%, Cr 20%			
PROPRIEDADES	k = 2,1	$\rho = 1,08$	$\alpha_R = 100$	$\rho_L = 13,2$
DESIGNAÇÃO	Níquel			
COMPOSIÇÃO	Ni 99,98%			
PROPRIEDADES	k = -12,1	$\rho = 0,075$	$\alpha_R = 5900$	$\rho_L = 13$

ρ [$\Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$]	α_R [ppm / $^{\circ}\text{C}$]	ρ_L [ppm / $^{\circ}\text{C}$]
---	---	---------------------------------------

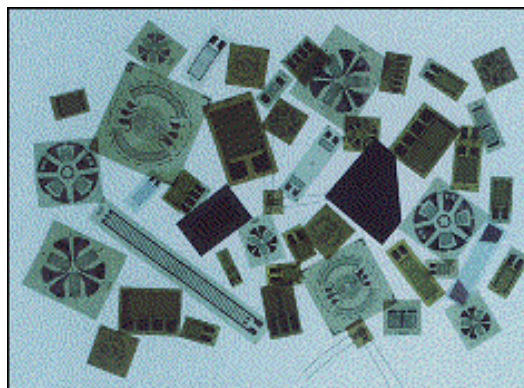
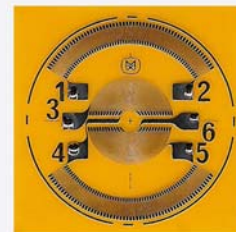
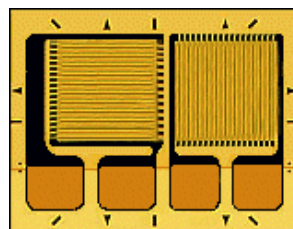
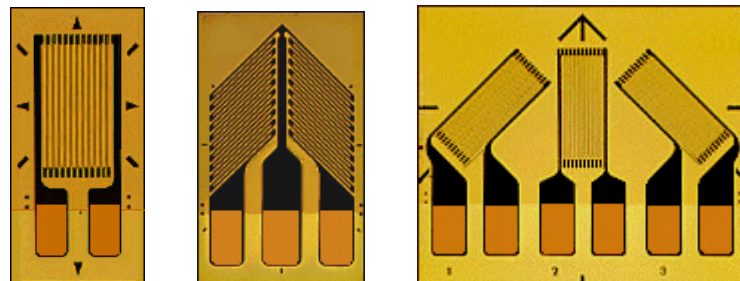
Ref: <http://www.pelicanwire.com/>; <http://www.mwswire.com/resist2.htm>; <http://www.kanthal.com/>

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.2 – EXTENSÔMETRO ELÉTRICO DE RESISTÊNCIA VARIÁVEL

Modelos fabricados

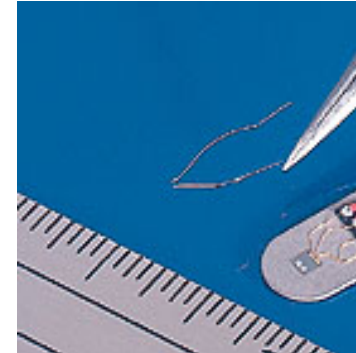
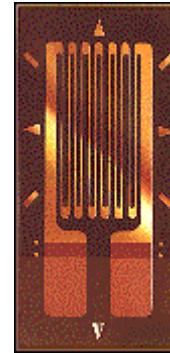
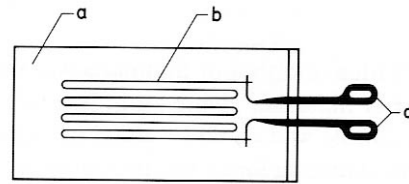


CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

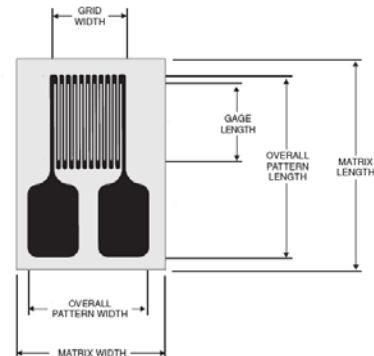
2.2 – EXTENSÔMETRO ELÉTRICO DE RESISTÊNCIA VARIÁVEL

Tipos de SG elétricos



Características elétricas e mecânicas de um SG

Dimensões e geometria



008CL - 120			
			
GAGE LENGTH	OVERALL LENGTH	GRID WIDTH	OVERALL WIDTH
0.008	0.080	0.010	0.068
0.20	2.03	0.25	1.73
MATRIX SIZE		0.20L x 0.13W	
		5.1L x 3.3W	

Gage factor

Auto-compensação

Sensibilidade transversal

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.2 – EXTENSÔMETRO ELÉTRICO DE RESISTÊNCIA VARIÁVEL

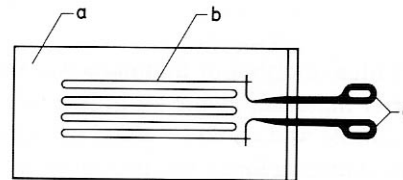
Sensibilidade transversal

A deformação transversal ao eixo do extensômetro também provoca uma alteração na sua resistência elétrica. Assim o extensômetro é sensível a deformações nas duas direções.

O fator de sensibilidade transversal é definido como:

$$k_T = \frac{k_{\perp}}{k_{\parallel}}; \quad k_{\perp} : (\varepsilon_y = \varepsilon; \varepsilon_x = 0); \quad k_{\parallel} : (\varepsilon_x = \varepsilon; \varepsilon_y = 0)$$

Para um extensômetro de fio, $k_T = \frac{\pi \cdot r}{2l + \pi \cdot r}$, sendo l o comprimento do trecho reto e r o raio das voltas do fio.



O fator de sensibilidade do extensômetro, k , é medido num campo uniaxial de tensão, com $\nu = 0,28$, logo inclui o efeito da sensibilidade transversal.

Exemplo: Um extensômetro de fio com 10 mm de comprimento da grade e 1 mm entre cada volta, tem sensibilidade transversal de 5,6%.

Para extensômetros de lâmina metálica, a sensibilidade transversal é muito menor, pela redução da resistência nas voltas, sendo hoje menor do que 0,5%.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.2 – EXTENSÔMETRO ELÉTRICO DE RESISTÊNCIA VARIÁVEL

Características elétricas e mecânicas de um SG - Data sheet



Dehnungsmeßstreifen
Strain Gauges
Jauges d'extensométrie

Widerstand
Resistance
Résistance

120 $[\Omega]$ + 0,20 [%]
- 0,20 [%]

k-Faktor
Gauge factor
Facteur k

2,00 $\pm$ 1 [%]

Querempfindlichkeit
Transverse Sensitivity
Sensibilité transverse

+0,2 [%]

- [%]

Temperaturkompensation: Angepaßt für
Temperature Compensation: Compensated for
Compensation de température: Compensation pour

$\alpha = 10,8 [10^{-6} / ^\circ\text{C}]$



Typ 3/120LY11*
US-Type

Stückzahl
Quantity
Quantité

10

mit
with
avec



ohne
without
sans



Applikationshilfe
Application aid
Support d'aide à l'application

Temperaturkoeffizient
des k-Faktors

Temperature coefficient
of gauge factor

Coefficient de température
du facteur k

104 $\pm$ 10 $[10^{-6} / ^\circ\text{C}]$

(-10 ... +45 $^\circ\text{C}$)

Artikel Nr.
Part No.
No. de Réf.

1-LY11-3/120*

Folienlos
Lot
Lot de la feuille

A267/38

Herstellungslos
Batch

Lot de fabrication

801609/03

Alle technischen Daten nach OIML IR 62, bei Beachtung der abweichenden Toleranzangaben auch nach VDI/VDE 2635. Geben Sie bei Rückfragen bitte DMS-Typ und Herstellungs-Los an.

All technical data in accordance with OIML IR 62, also compliant with VDI/VDE 2635 if deviating tolerances are observed. In case of further inquiries please indicate gauge type and batch number.

Toutes caractéristiques techniques selon OIML IR 62 et VDI/VDE 2635 pour les indications différentes de tolérance. Pour toutes questions, indiquer le type de la jauge ainsi que le lot de fabrication.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.2 – EXTENSÔMETRO ELÉTRICO DE RESISTÊNCIA VARIÁVEL

Características elétricas e mecânicas de um SG - Data sheet

TEMPERATURE COMPENSATION FOR TEMPERATURKOMPENSATION FÜR COMPENSATION DE TEMPERATURE POUR COMPENSAÇÃO DE TEMPERATURA PARA	STEEL STAHL ACIER AÇO	STAINLESS STEEL ROSTFREIER STAHL ACIER INOX AÇO INOXIDÁVEL	ALUMINUM ALUMINIUM ALUMINIUM ALUMINIO	MAGNESIUM MAGNESIUM MAGNESIUM MAGNÉSIO	GAGE RESISTANCE WIDERSTAND RESISTANCE RESISTÊNCIA
					Ω 120.0 ± 0.3
TYPE, TIPO KFC-5-C1-16	ADOPTABLE THERMAL EXPANSION ABGESTIMMT FÜR WÄRMEAUDEHNUNGS KÖEFFIZIENT COEFFICIENT DE DILATATION COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA AFERIDO			16.2 PPM / °C	GAGE FACTOR K- FAKTOR FACTEUR DE JAUGE FATOR DA RESISTÊNCIA
	GAGE LENGTH MESSGITTER LÄNGE LONGUEUR DE LA JAUGE COMPRIMENTO DA RESISTÊNCIA			5 m.m.	THERMAL OUT PUT WARMEABGABE DERIVE THERMIQUE RENDIMENTO TERMICO
	GAGE FACTOR CHANGE WITH TEMPERATURE TEMPERATURABHÄNGIGKEIT DES K- FAKTORS DERIVE THERMIQUE DU FACTEUR DE JAUGE MUDANÇA DO FATOR DE CALIBRAÇÃO COM A TEMPERATURA			0.015 % / °C	
	LOT NO. GRUNDSTÜCK NR.	LOT NO. LOTE NO.	Y081 - 131		QUANTITY QUANTITÉ MENGE QUANTIDADE
			10		

STRAIN GAGES

CEA-06-240UZ

CEA-06-240UZ

Gage Type

120.0 $\pm$ 0.3%

Resistance in Ohms at 24°C

2.08nom

Gage Factor at 24°C

(+0.4 $\pm$ 0.2)%

Transverse Sensitivity at 24°C

Option

R-A44AD569

Lot Number

112312-6835

Code

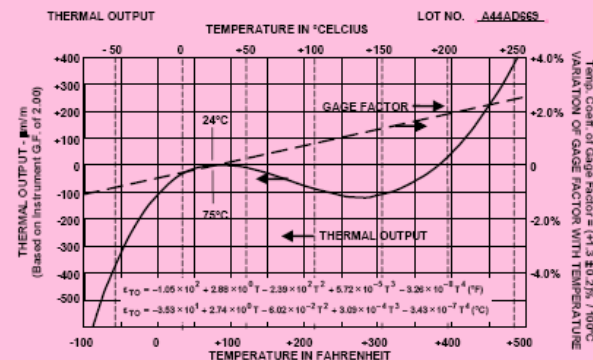


Micro-Measurements
Division

MEASUREMENTS

P.O. Box 27777
Raleigh, North Carolina 27611
(919) 365-3800

SELF-TEMPERATURE COMPENSATION: These gages have been manufactured with self-temperature compensation (STC) characteristics to minimize thermal output (see Tech Note TN-504). Thermal output data given below are valid only for the indicated test material, since thermal output is a function of the thermal expansion properties of the test specimen.



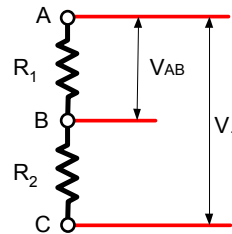
TESTED ON: 1018 STEEL TEST PATTERN: T004R CODE: 92828 ENG: JP

CURSO EXTENSOMETRIA

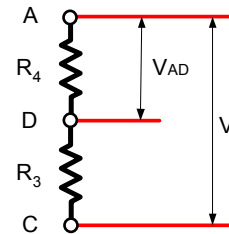
AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.3 – PONTE DE WHEATSTONE

Divisor de tensão

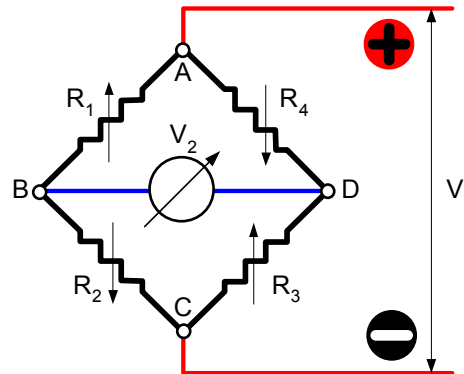


$$V_{AB} = V_1 \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$



$$V_{AD} = V_1 \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

Ponte de Wheatstone
Charles Wheatstone, 1843.



$$V_2 = V_{AB} - V_{AD} \quad V_2 = V_1 \frac{R_1}{R_1 + R_2} - V_1 \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.3 – PONTE DE WHEATSTONE

Tensão na saída da ponte

A relação V_2/V_1 em fundo de escala, típica em transdutores, como células de carga, clip gages, e outros, com ponte completa, é de 2 mV de saída para cada 1 V da alimentação.

Para uma conversão AD em 10 bits, hoje praticamente não usada, existem 1024 níveis, exigindo uma resolução de 20 μV na leitura de V_2 , caso a alimentação da ponte seja de 10 V.

Se a leitura é de uma grandeza de 10% do fundo de escala, a leitura de V_2 passa a ser de apenas 2 μV .

Com uma conversão com maior número de bits a resolução necessária será ainda menor.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.3 – PONTE DE WHEATSTONE

Equação geral da PW

$$V_2 = V_1 \frac{R_1}{R_1 + R_2} - V_1 \frac{R_4}{R_3 + R_4}; \quad \text{ou} \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$$

A saída da ponte será zero nas condições:

$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4 \quad \text{ou} \quad \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$$

Linearização para pequenas perturbações

$$R_i = R_g + \Delta R_i; \quad \Delta R_i \cdot \Delta R_j \ll R_i$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{4} \left[\frac{\Delta R_1 - \Delta R_2 + \Delta R_3 - \Delta R_4}{R + 1/2(\Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_3 + \Delta R_4)} \right]$$

Considerando adicionalmente que no denominador a soma $\Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_3 + \Delta R_4$ é muito menor do que R , obtém-se:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{4} \left[\frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} - \frac{\Delta R_4}{R} \right]$$

Equação linearizada tradicional da ponte de Wheatstone.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.3 – PONTE DE WHEATSTONE

Partindo da equação linearizada,

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{4} \left[\frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} - \frac{\Delta R_4}{R} \right],$$

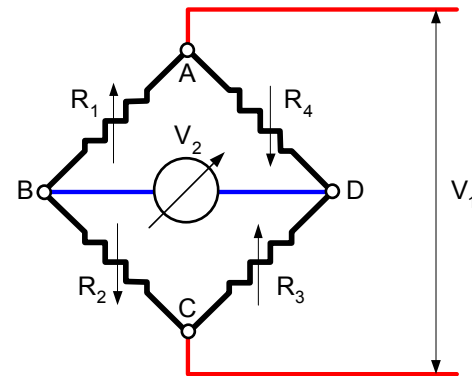
aplicando a equação básica da extensometria,

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon$$

E considerando que todos os extensômetros sejam idênticos, possuem o mesmo fator de sensibilidade,

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{k}{4} [\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4]$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{k}{4} [+ \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4]$$



É fundamental observar a alternância de sinal, nos quatro braços da ponte, como esquematizado pelas setas na figura.

CURSO EXTENSOMETRIA

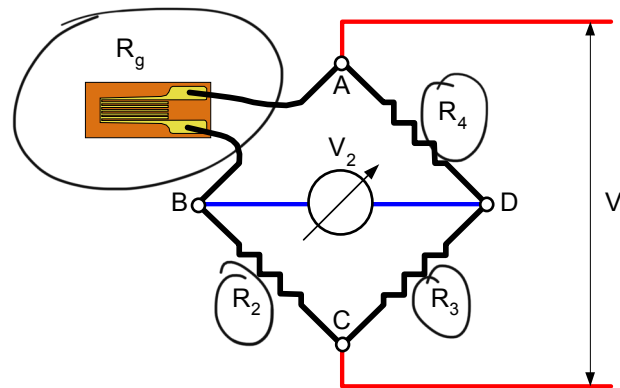
AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.3 – PONTE DE WHEATSTONE

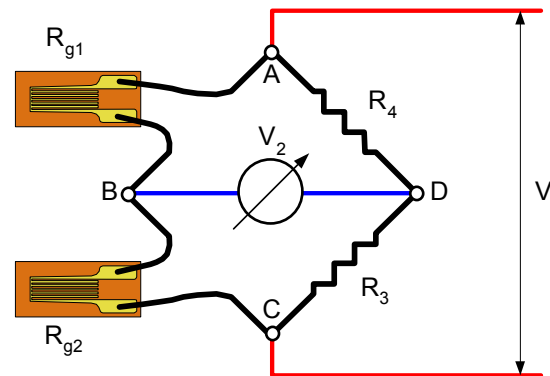
Tipos de PW, 1/4, 1/2, 1/4 + 1/4, 4/4

Esta designação diz respeito ao número de braços da ponte com extensômetros, não quanto ao número de ativos.

Um quarto de ponte



Meia ponte



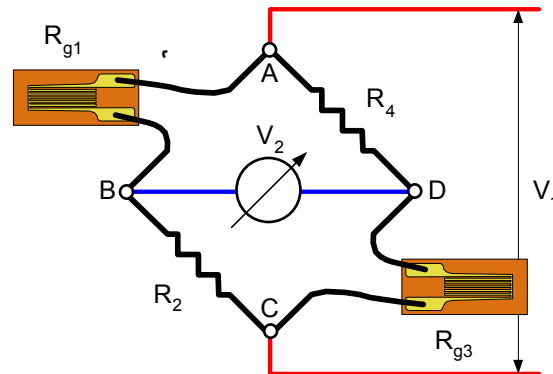
CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

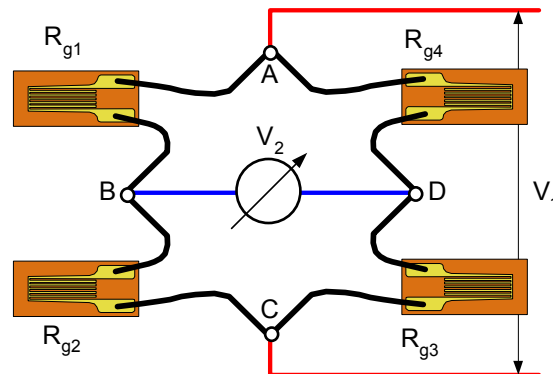
2.3 – PONTE DE WHEATSTONE

Tipos de PW, $1/4$, $1/2$, $1/4 + 1/4$, $4/4$

Meia ponte diagonal ou $1/4 + 1/4$



Ponte completa



CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.3 – PONTE DE WHEATSTONE

Para grandes variações na resistência, seja para extensômetros piezo resistivos, como por grande deformações, a equação linearizada apresenta erros crescentes, em especial na configuração de quarto de ponte.

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{4} \left[\frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} - \frac{\Delta R_4}{R} \right]; \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$$

No caso de quarto de ponte,

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}; \quad \text{ou}$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{(R + \Delta R_1)R - R^2}{(R + \Delta R_1 + R)(2 \cdot R)}$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{4} \left[\frac{\Delta R_1}{R} \right] \left[\frac{1}{1 + 1/2 \cdot \Delta R_1 / R} \right];$$

contra $\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{4} \left[\frac{\Delta R_1}{R} \right]$ solução linear

Se $\Delta R/R = 0,10$ a solução exata é 5% menor do que a aproximada.

CURSO EXTENSOMETRIA

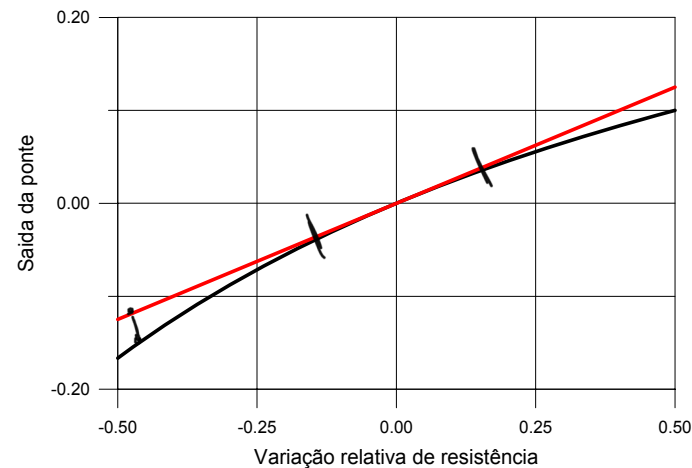
AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.3 – PONTE DE WHEATSTONE

Para o caso de quarto de ponte, ocorre o efeito não linear de forma mais significativa. O efeito não linear é mais relevante com redução da resistência, ou seja, deformação compressiva.

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{4} \left[\frac{\Delta R_1}{R} \right] \left[\frac{1}{1 + 1/2 \cdot \Delta R_1 / R} \right]; \text{ solução exata}$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{4} \left[\frac{\Delta R_1}{R} \right]; \text{ solução linear}$$



A curva de resposta da ponte de Wheatstone é indicada em preto. A reta em vermelho representa a resposta linearizada.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.3 – PONTE DE WHEATSTONE

No caso de meia ponte,

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}; \text{ ou}$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{(R + \Delta R_1) R - (R + \Delta R_2) R}{(R + \Delta R_1 + R + \Delta R_2)(2 \cdot R)}$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{4} \left[\frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} \right] \left[\frac{1}{1 + 1/2 \cdot (\Delta R_1/R + \Delta R_2/R)} \right];$$

$$\text{contra } \frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{4} \left[\frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} \right] \text{ da solução linear}$$

Como em geral $\Delta R_2 \cong -\Delta R_1$ ocorre cancelamento do efeito da não linearidade, ao menos parcial.

CURSO EXTENSOMETRIA

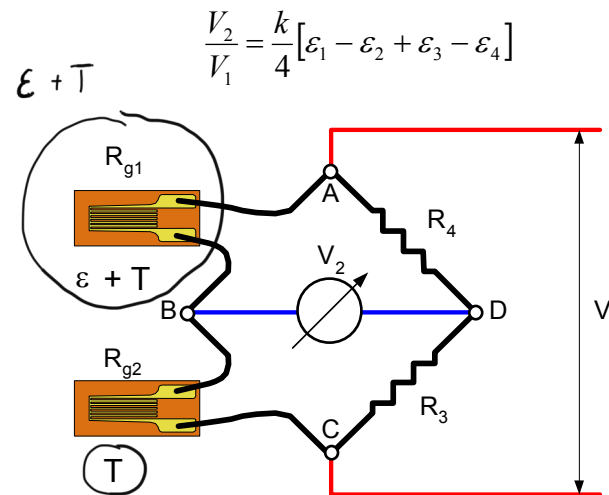
AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.3 – PONTE DE WHEATSTONE

Compensação de temperatura

Um quarto de ponte com dummy.

Faz a compensação de temperatura no ponto de medida, compensando a diferença entre os coeficientes de dilatação térmica, extensômetro e peça instrumentada.



Para uma compensação perfeita os dois extensômetros devem ser idênticos, mesmo lote, bem como devem estar sujeitos à mesma temperatura, com o dummy montado sobre uma parte não tensionada do material, ou orientado adequadamente.

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{k}{4} \left(+(\varepsilon + T) - T + \dots \right)$$

CURSO EXTENSOMETRIA

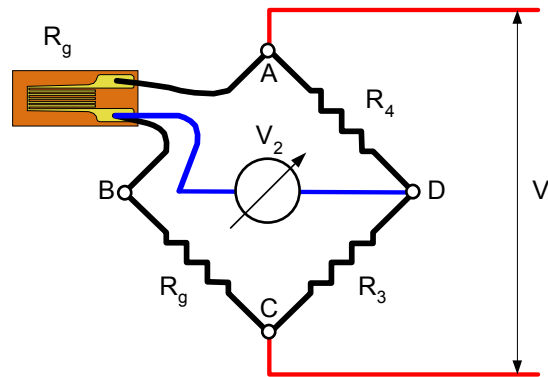
AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.3 – PONTE DE WHEATSTONE

Compensação de temperatura

Quarto de ponte a três fios

Faz a compensação do efeito da temperatura sobre a fiação, essencial na configuração de quarto de ponte.



$$R_1 = R_c + R_g + R_c ; \quad R_2 = R_c + R_c + R_g$$

Para uma compensação perfeita os três fios devem ser idênticos, bem como devem estar sujeitos à mesma temperatura. Assim a ponte enxerga efeitos simétricos da resistência dos fios para o braço 1 e para o braço 2. É essencial em análise experimental de tensões, que usa muitas configurações de quarto de ponte, com cabos longos.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

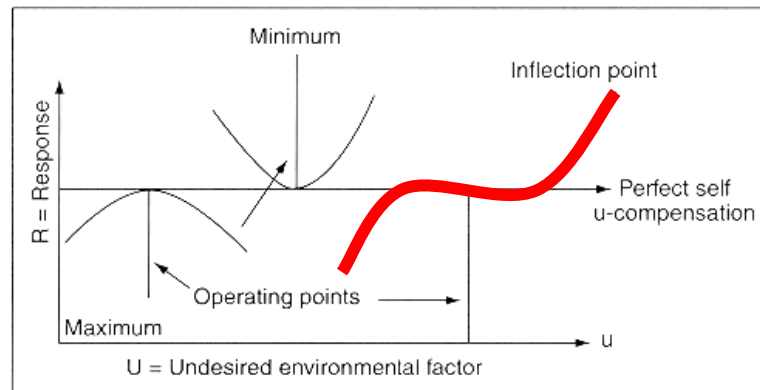
2.3 – PONTE DE WHEATSTONE

Compensação de temperatura

Auto compensação.

São extensômetros fabricados com técnicas especiais, que dentro de uma faixa de trabalho quase eliminam o efeito da diferença nos coeficientes de dilatação térmica.

$$\left. \frac{dR}{R} \right|_{\Delta T} = (\alpha_{\text{material}} - \alpha_{\text{gage}}) k \Delta T + \alpha_R \Delta T$$



Para ajustar a liga metálica da grade para o coeficiente de dilatação térmica de diferentes materiais, são considerados os diferentes efeitos sobre α_R , afetando a mobilidade dos elétrons, trabalhado sobre:

- Pequenas mudanças na composição química;
- Diferentes graus de encruamento no processo de laminação;
- Processos de recozimento ajustado.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

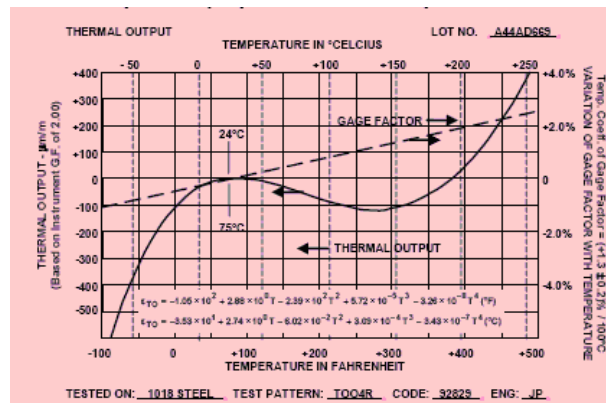
2.3 – PONTE DE WHEATSTONE

Compensação de temperatura

Os extensômetros com auto compensação de temperatura em geral tem um número que define o grau de compensação, referenciado como STC, **Self Temperature Compensation**.

1	for ferritic steel	with $\alpha = 10.8 \cdot 10^{-6}/K$
3	for aluminum	with $\alpha = 23 \cdot 10^{-6}/K$
5	for austenitic steel	with $\alpha = 16 \cdot 10^{-6}/K$
6	for quartz	with $\alpha = 0.5 \cdot 10^{-6}/K$
7	for titanium/gray cast iron	with $\alpha = 9 \cdot 10^{-6}/K$
8	for plastic material	with $\alpha = 65 \cdot 10^{-6}/K$
9	for molybdenum	with $\alpha = 5.4 \cdot 10^{-6}/K$

No entanto os extensômetros não eliminam por completo o efeito da temperatura e muitos fabricantes fornecem o **resíduo de deformação** que ainda surge. Esta deformação aparente é em geral referida como **Thermal Output**.

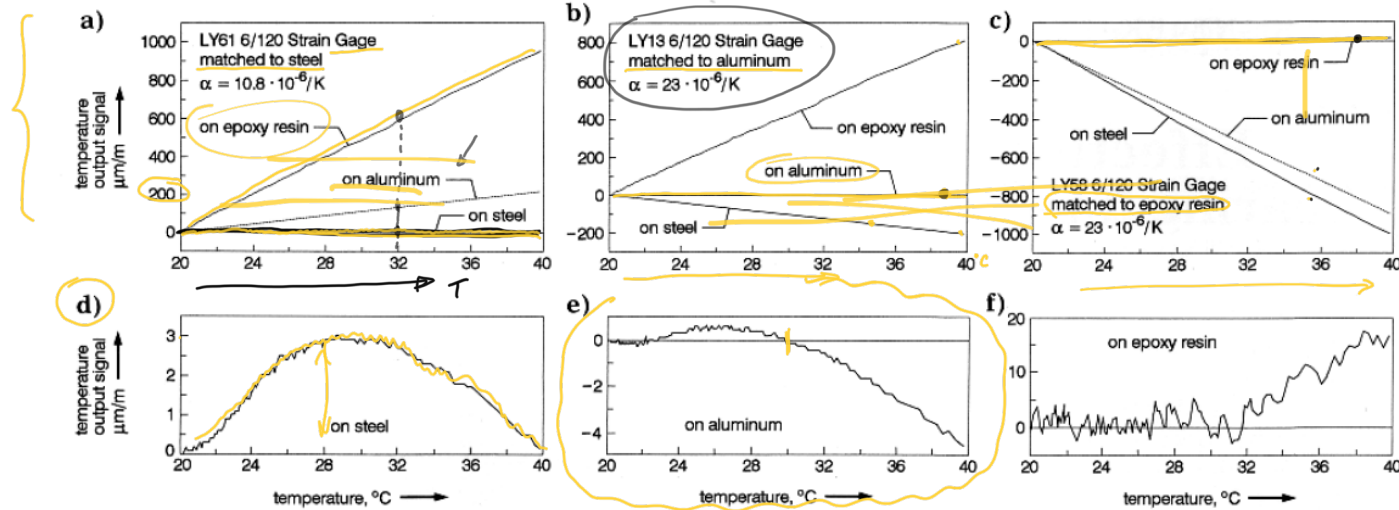
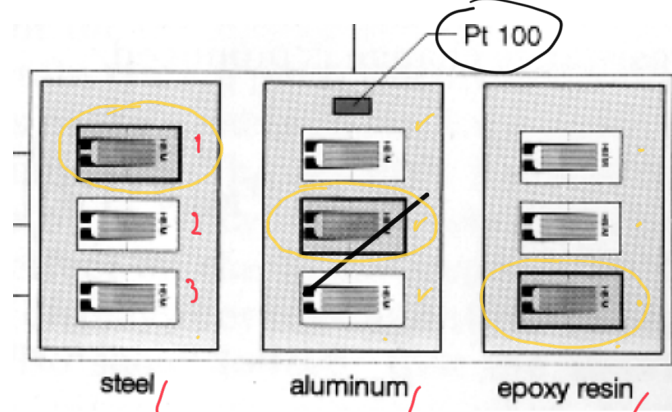


CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.3 – PONTE DE WHEATSTONE

Compensação de temperatura



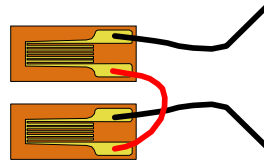
CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.3 – PONTE DE WHEATSTONE

Compensação de campo magnético

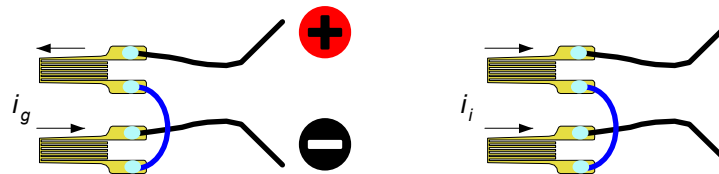
Uso de dois extensômetros com sentido contrário da corrente.



A corrente induzida em um é anulada pelo outro.

Corrente de alimentação

Corrente induzida



CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.3 – PONTE DE WHEATSTONE

Efeito da resistência à terra.

Apesar da base do extensômetro ser polimérica, bem como o adesivo, problemas de isolamento entre a grade ou a fiação e a terra pode fazer com que uma baixa resistência elétrica se verifique. Uma causa comum é a infiltração de umidade, contaminando os isolamentos.

Para a ponte é como se a resistência do extensômetro tivesse diminuído, pela resistência à terra, R_t , em paralelo com R_g . Surge assim uma deformação aparente. Analisando o caso de quarto de ponte,

$$R = \frac{R_g R_t}{R_g + R_t}; \quad \Delta R = R - R_g$$

$$\frac{\Delta R}{R_g} = \frac{R_t}{R_g + R_t} - 1 = -\frac{R_g}{R_g + R_t}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon_{ap} = -\frac{R_g}{R_g + R_t}; \quad \varepsilon_{ap} = -\frac{1}{k} \frac{1}{1 + R_t/R_g}$$

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.3 – PONTE DE WHEATSTONE

Efeito da resistência à terra.

Exemplo.

Considerando que $k = 2$ e uma deformação aparente tolerável de 10^{-6} , a resistência à terra deve ser ao menos $5 \cdot 10^5$ vezes maior que a resistência do extensômetro.

Para um extensômetro de 350Ω isto representa ao menos $175\text{ M}\Omega$ de resistência à terra. Em geral se recomenda mais de $1\text{ G}\Omega$.

A especificação E 1237 da ASTM para a instalação de extensômetros recomenda um mínimo de resistência à terra de $20\text{ M}\Omega$.

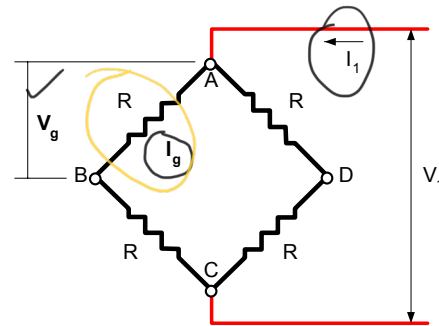
O desejável é $1\text{ G}\Omega$, sendo que em instalações bem feitas é normal se obter uma resistência de até $10\text{ G}\Omega$.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.3 – PONTE DE WHEATSTONE

Efeito Joule no extensômetro



$$\begin{aligned} P &= I \cdot V \\ P &= I^2 \cdot R \\ P &= V^2 / R \end{aligned}$$

$$P_g = V_g \cdot I_g ; \quad V_g = V_1 / 2 ; \quad I_g = I_1 / 2$$

$$P_g = 1/4 V_1^2 / R_g$$

$$P_g = P_o \cdot A_{GRID} ; \quad P_o = P_g / A_{GRID} \text{ [mW / mm}^2\text{]}$$

Um extensômetro de $120 \, \Omega$ alimentado com 8 V, tendo $10 \, \text{mm}^2$ de área da grade, dissipa

$$64 / 120 / 10 = 0,0533 \, \text{W / mm}^2$$

$$P_o = 53,3 \, \text{mW / mm}^2$$

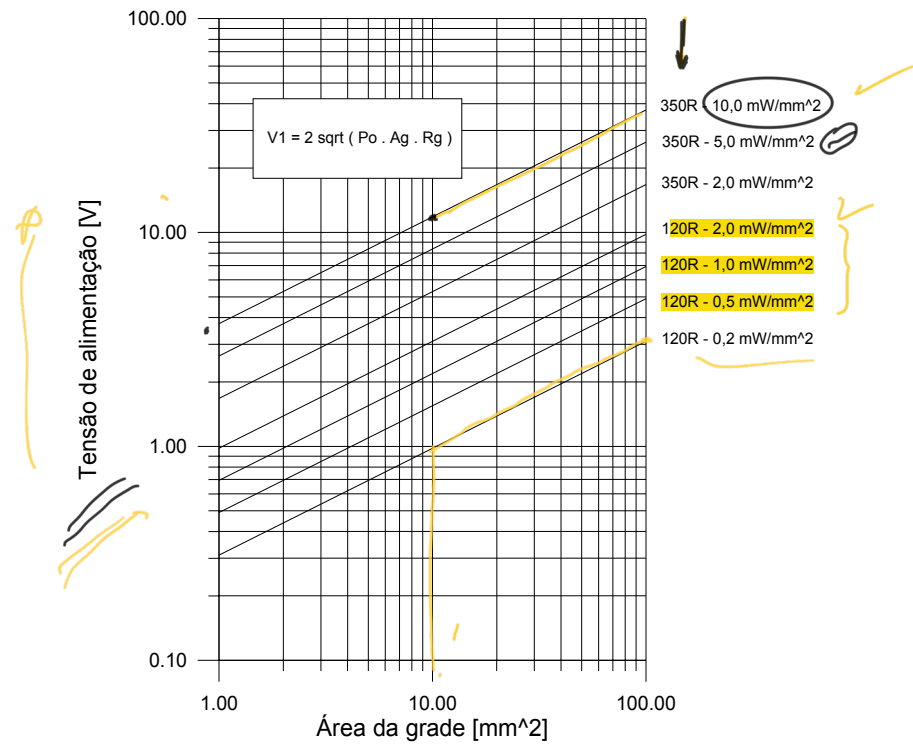
Aplicado sobre material de baixa condutividade térmica é suficiente para colocar em ebulição o verniz protetor do SG!

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.3 – PONTE DE WHEATSTONE

Capacidade de dissipação térmica



As curvas da figura acima indicam a relação entre a tensão de alimentação da ponte e a potência dissipada. A potência específica, por unidade de área da grade, varia em geral entre:

$$P_0: (0,01; 50,0) \text{ [mW / mm}^2\text{]}$$

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.3 – PONTE DE WHEATSTONE

Capacidade de dissipação térmica

Exemplo:

Considerando o extensômetro ilustrado, com uma área de grade de $0,05 \text{ mm}^2$, adotando uma potência específica dissipada, P_0 de 10 mW/mm^2 , resulta que a tensão de alimentação da ponte não pode ultrapassar $0,5 \text{ V}$.

008CL - 120			
			
1X	6X		
GAGE LENGTH	OVERALL LENGTH	GRID WIDTH	OVERALL WIDTH
0.008	0.080	0.010	0.068
0.20	2.03	0.25	1.73
MATRIX SIZE		0.20L x 0.13W	5.1L x 3.3W



De acordo com catálogo da HBM, o extensômetro LY11-6/120 tem a grade de $6 \text{ mm} \times 2,8 \text{ mm}$, logo $16,8 \text{ mm}^2$ de área. A máxima tensão de alimentação da ponte recomendada é de 8 V. Isto leva a uma potência dissipada na grade do extensômetro de $0,133 \text{ W}$ e uma potência específica de $7,9 \text{ mW/mm}^2$.

Para o extensômetro LY41-6/1000, a grade é de $6 \text{ mm} \times 4,3 \text{ mm}$, área de grade de $25,8 \text{ mm}^2$ e a tensão máxima de alimentação da ponte é de 27 V . Neste caso a potência dissipada é $0,182 \text{ W}$ e a potência específica fica em $P_0 = 7,1 \text{ mW/mm}^2$.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.3 – PONTE DE WHEATSTONE

Capacidade de dissipação térmica

VALORES RECOMENDADOS DE POTÊNCIA DISSIPADA NA ÁREA DA GRADE.

CAPACIDADE DE DISSIPACÃO TÉRMICA	EXEMPLO	POTÊNCIA DISSIPADA [mW / mm ²]
Excelente	Alumínio, cobre	3,0 a 8,0 ✓
Bom	Aço espesso	1,5 a 3,0
Razoável	Aço fino, titânio	0,5 a 1,0
Ruim	Plástico reforçado	0,15 a 0,30
Muito ruim	Plástico sem carga	0,015 a 0,03
Referência: Micro Measurements TN 502		

Os valores tabelados são para medidas estáticas. Se forem solicitações dinâmicas, a potência pode ser até 5 vezes maior.

Os valores são para medidas de precisão, com alta estabilidade térmica. Para medidas de moderada precisão, multiplicar por 2.

Para medidas de baixa precisão, os valores tolerados de potência dissipada pode ser 5 vezes maior que o tabelado.

Um valor orientativo é de 5 a 7,5 mW/mm². Em geral varia, dependendo da aplicação, entre 1 e 15 mW/mm².

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.3 – PONTE DE WHEATSTONE

Capacidade de dissipação térmica

O aquecimento não controlado do extensômetro e portanto da base e do adesivo, provoca problemas do tipo:

Longo tempo para estabilizar o ponto de zero;

Instabilidade do ponto de zero;

Má compensação de temperatura;

Creep no adesivo e fuga do ponto de zero;

Histerese do sistema;

Um aquecimento excessivo pode ser contornado com a inclusão de resistores em série com a ponte, na alimentação da mesma. Isto baixa a tensão na ponte, mas reduz também a sensibilidade da mesma.

Para não baixar a alimentação é possível usar extensômetros com maior resistência, 350Ω , 500Ω ou até mesmo 1000Ω , ao invés de 120Ω .

$$\frac{V_2}{V_1} = 2m \frac{V}{V}$$

1V $\rightarrow$ 2mV saída



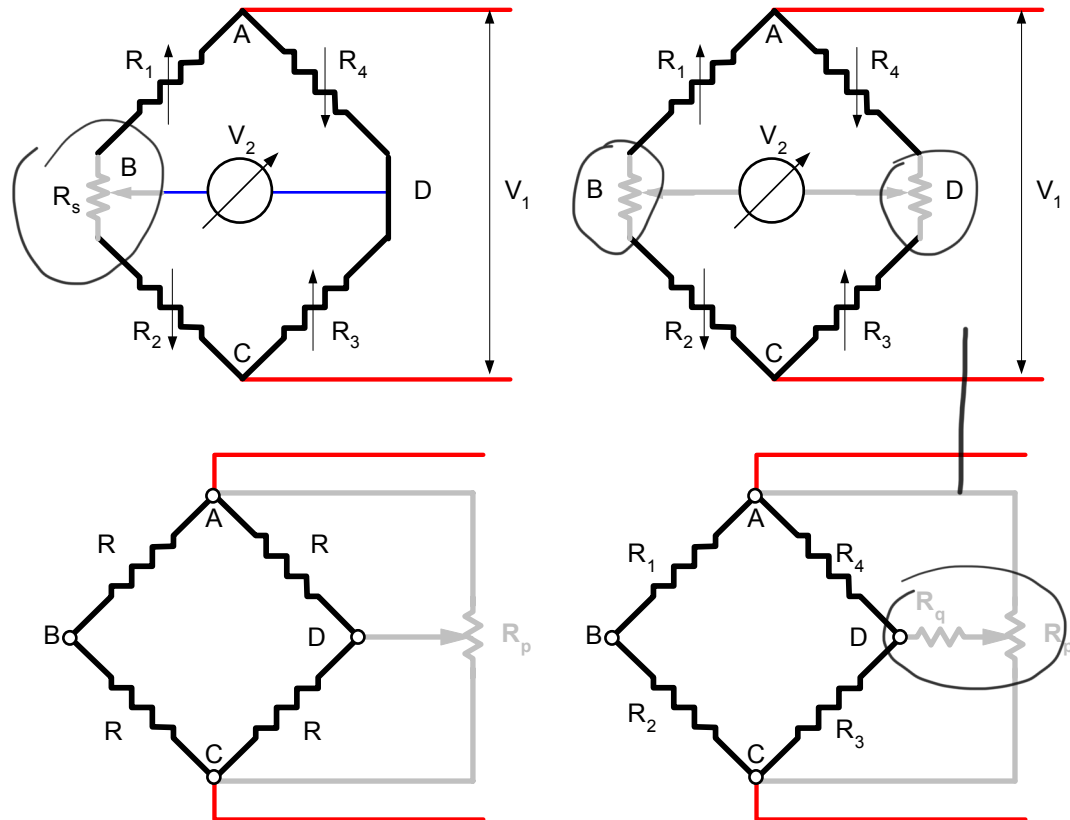
Alimentação

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.3 – PONTE DE WHEATSTONE

Circuitos de zeragem



A recomendação é de que $R_s \ll R_g$ e que $R_p \gg R_g$. Isto reduz a possibilidade de perda de sensibilidade da ponte.

Valores típicos, $R_p \geq 100 R_g$ e $R_s \leq 0,01 R_g$ para limitar a variação de resistência a no máximo 1% de R_g . R_q é inserido para limitar o efeito do potenciômetro e também lineariza este efeito.

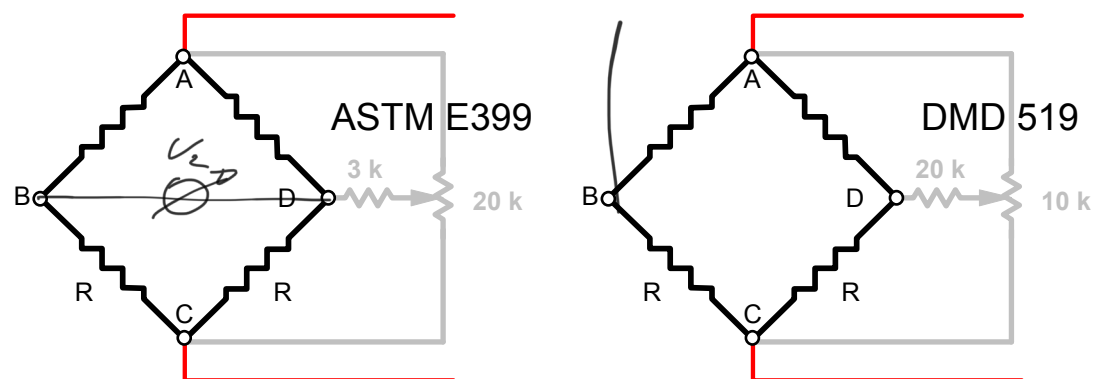
CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

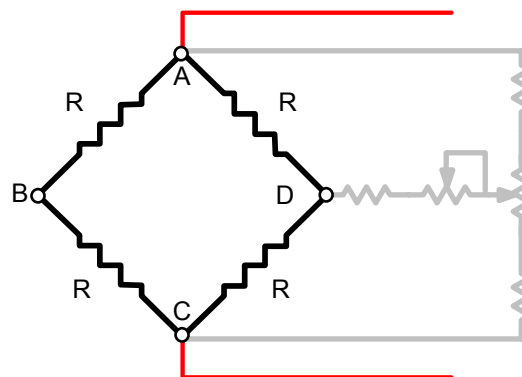
2.3 – PONTE DE WHEATSTONE

Circuitos de zeragem

Este último circuito é bastante versátil e usual em casos práticos, como mostrado nestes dois exemplos, com indicação dos valores dos resistores.



Uma última configuração do circuito de zeragem, mais completa,



CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.3 – PONTE DE WHEATSTONE

Análise da perda de sensibilidade da ponte

Quando o extensômetro, por alguma razão, é ligado em série com um resistor, a sensibilidade do conjunto fica afetada.

Considerando um extensômetro com um resistor em série, a resistência do conjunto é dada pela soma,

$$R = R_s + R_g$$

Porém a variação de resistência é definida apenas por R_g ,

$$\Delta R = R_g \cdot k\varepsilon$$

Assim a relação $\Delta R/R$ passa a ser

$$\frac{\Delta R}{R} = k_{ap} \cdot \varepsilon = \frac{R_g \cdot k\varepsilon}{R_s + R_g}; \quad k_{ap} = k \frac{1}{1 + R_s/R_g}$$

Desta forma para que k_{ap} não seja muito menor do que k , a relação $R_s \ll R_g$ deve ser atendida. Caso $R_s = R_g$, k_{ap} será a metade do valor nominal do gage factor.

Uma situação de perda de sensibilidade é quando os cabos são muito longos. Sendo R_c a resistência elétrica dos cabos, vem:

1/4 de ponte, 2 fios

$$k_{ap} = k \frac{1}{1 + 2R_c/R_g}$$

1/4 de ponte, 3 fios

$$k_{ap} = k \frac{1}{1 + R_c/R_g}$$

1/2 ponte

$$k_{ap} = k \frac{1}{1 + R_c/R_g}$$

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.4 – OUTRAS FORMAS DE INSTRUMENTAÇÃO

Embora a ponte de Wheatstone seja de uso generalizado, outras formas de instrumentação são possíveis.

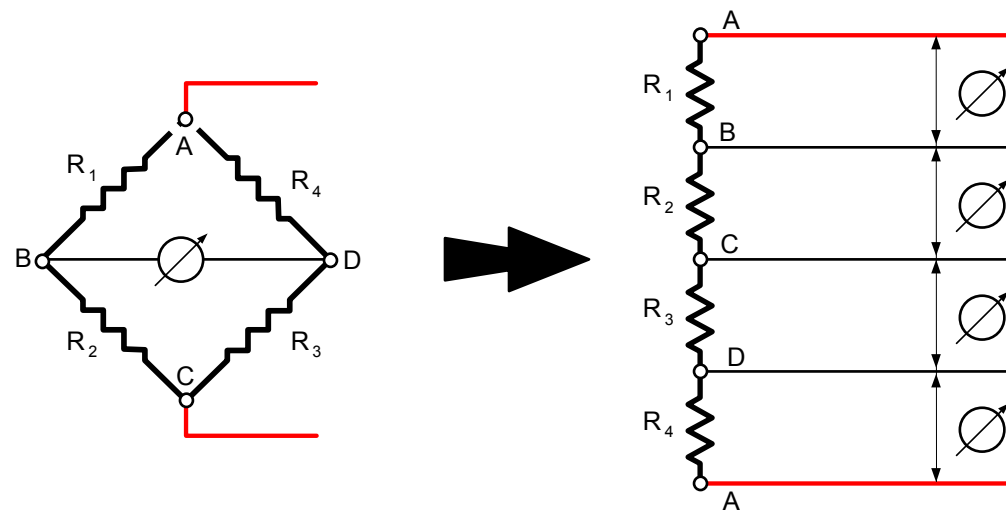
1 - Anderson loop, NASA.

Alimentação por laço de corrente.

Maior flexibilidade do que a ponte de Wheatstone tradicional.

Sinais individualizados de cada SG, não o efeito sobreposto.

Hardware de aquisição é mais complexo, não comercial.



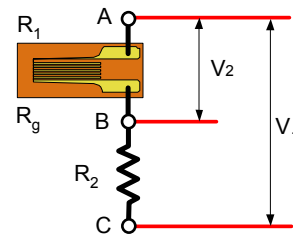
CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.4 – OUTRAS FORMAS DE INSTRUMENTAÇÃO

2 – Circuito potenciométrico

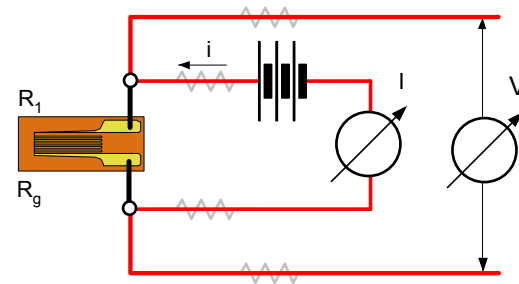
Usa o princípio do divisor de tensão.



$$\frac{\Delta V_2}{V_1} = \frac{(R + \Delta R)_1}{(R + \Delta R)_1 + (R + \Delta R)_2} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad ; \quad R_1 = R_g$$

$$\frac{\Delta V_2}{\varepsilon} = \frac{r}{1+r} \cdot k \cdot R_g \cdot I_g \quad ; \quad r = \frac{R_2}{R_g} > 1 \quad ; \quad (r = 9)$$

3 – Circuito de Kelvin



$$R_g = \frac{V}{I}$$

Este circuito para a instrumentação é essencialmente imune aos efeitos da resistência dos cabos e ao aquecimento dos mesmos. Pode ser usado para distâncias de até 1000 m.

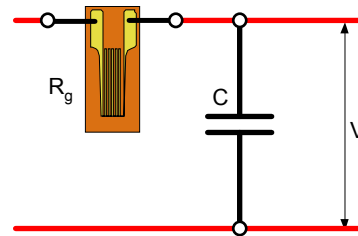
CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.4 – OUTRAS FORMAS DE INSTRUMENTAÇÃO

4 – Circuito RC, constante de tempo.

Uma outra técnica de instrumentação de extensômetros está baseada na constante de tempo τ de um circuito RC, no qual o resistor é formado pelo extensômetro e é adicionado um capacitor de valor adequado, de forma que a constante de tempo do circuito, para descarga do capacitor através do resistor, seja da ordem de 100 μs . Um circuito de precisão de medida de tempo, com resolução da ordem de 30 ps ou menos mede esta constante de tempo. Tal permite detectar mínimas variações de resistência, logo de deformação. Resolução melhor do que 1:10⁶.



$$V(t) = V_0 \cdot e^{-t/\tau}$$

$$\tau = RC \quad ; \quad \tau [s] \quad ; \quad R [\Omega] \quad ; \quad C [F]$$

$$R_g = \frac{\tau}{C}$$

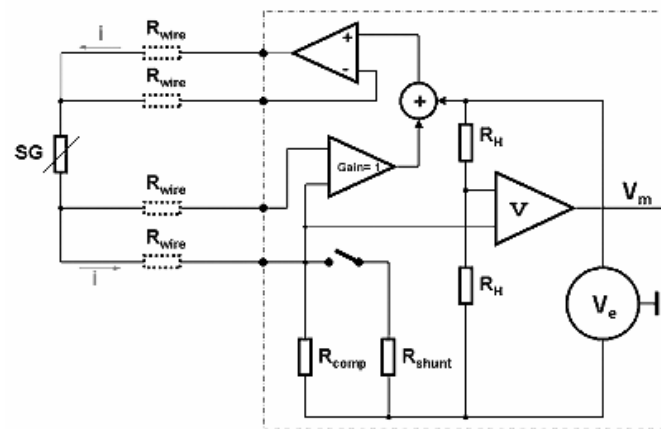
CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 2 – EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

2.4 – OUTRAS FORMAS DE INSTRUMENTAÇÃO

5 – Circuito 1/4 de ponte a quatro fios.

Compensação automática da resistência dos cabos e resistência de contato no resistor de calibração.



CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 3 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

Requisitos para transdutores

Materiais para transdutores

Tipos de SG

Tipos de adesivos

Fiação

Calibração

Transdutores de carga, célula de carga

Requisitos específicos

Tipos de célula de carga, geometria

Tração / compressão

Flexão

Cisalhamento

Torção

Transdutores de deslocamento, clip gages

Requisitos específicos

Formulação

Clip gage axial

Clip gage diametral

Circuitos de compensação

Compensação de zero

Compensação de spam

Tipos de célula de carga, circuito da ponte

Tração / compressão

Flexão

Cisalhamento

Torção

Célula de carga de seis eixos

Outros tipos de transdutores

Aceleração

Temperatura

Fadiga

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 3 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

3.1 – REQUISITOS PARA TRANSDUTORES

Requisitos gerais

Estabilidade da calibração ao longo do tempo.

Fatores que podem prejudicar:

- Aquecimento do SG
- Aquecimento do material do transdutor
- Aquecimento da fiação

Materiais para transdutores

Os materiais devem apresentar boa estabilidade no tempo, com elevado limite elástico, de forma a permitir trabalhar com tensões elevadas e assim aumentar a sensibilidade do sistema.

Ver tabela de materiais

Tipos de SG

Extensômetros fabricados com materiais mais estáveis, como por exemplo a base em resina epóxi reforçada com fibra de vidro.

Grade em constantan ou karma.

Resistência de grade elevada, valores usuais 350 Ω ou 1000 Ω . Definir a excitação da ponte tal que a potência dissipada no SG seja menos de 5 mW/mm², no caso de metal.

Para reduzir o efeito de creep no adesivo, usar o maior tamanho que seja possível, para a geometria do transdutor.

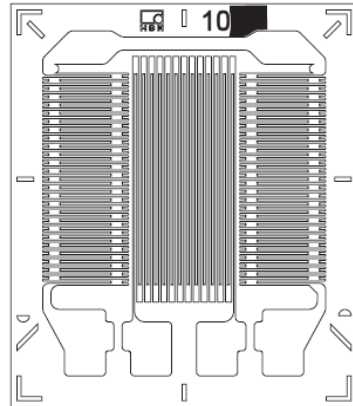
O tipo de SG depende do projeto do transdutor.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 3 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

3.1 – REQUISITOS PARA TRANSDUTORES

Tipos de SG



Column-type strain gage 1000 Ω

Dimensions:

- grid 1 length 1.3 mm - overall length 9.7 mm
- grid 1 width 5.1 mm - overall width 8.4 mm
- grid 2 length 5.1 mm
- grid 2 width 2.5 mm

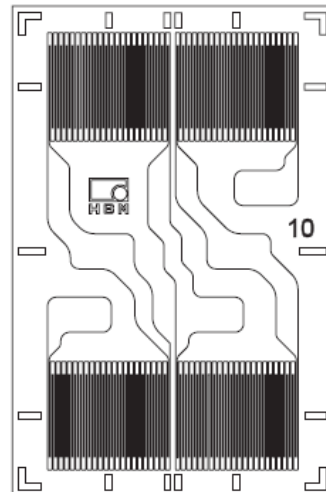
Technical data

Measuring grid

- material: Modco
- thickness: 5 μm

Carrier

- material: phenolic resin, glass-fiber reinforced
- base thickness: 35 $\mu\text{m} \pm 10 \mu\text{m}$
- cover thickness: 25 $\mu\text{m} \pm 8 \mu\text{m}$



Full-bridge strain gage 350 Ω , grid distance 7.5 mm

Dimensions:

- grid length 1.9 mm
- grid width 2.8 mm
- overall length 11.2 mm
- overall width 7.3 mm

Technical data

Measuring grid

- material: Constantan
- thickness: 5 μm

Carrier

- material: phenolic resin, glass-fiber reinforced
- base thickness: 35 $\mu\text{m} \pm 10 \mu\text{m}$
- cover thickness: 25 $\mu\text{m} \pm 8 \mu\text{m}$

Connections

- integrated solder pads

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 3 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

3.1 – REQUISITOS PARA TRANSDUTORES

Tipos de adesivos

Uso de adesivos especiais, de alta estabilidade, de cura a quente.

Camada de adesivo o mais fina possível.

Fiação

A fiação interna à ponte sempre em fio rígido, bitola compatível com os pads, terminais, dos SG.

Fiação externa ao transdutor sempre em fio flexível. Bitola compatível com o comprimento, de modo a não ter resistência maior que 1% da resistência do SG.

Usar sempre fiação com comprimentos simétricos.

Calibração

Shunt para análise experimental de tensões.
Célula de carga padrão para transdutor de força.
Torre de calibração para sensores de deslocamento.

Ajuste de zero

Ajusta a saída para entrada zero, em não mais de 1% do fundo de escala, em geral com sensibilidade da ordem de 2 mV/V.

Materials Selection Guide for Transducer Spring Elements

MATERIAL	PROPERTIES (in "as-normally-used" condition)*								RELATIVE FIGURE OF MERIT†									REMARKS	
	Modulus of Elasticity, psi x 10 ³ [1]	Yield Strength (0.2% offset) psi x 10 ³ [2]	Thermal Expansion Coeff., ppm/°F [3]	Density, lb/in ³ [4]	Max. Recommended Temperature, °F [5]	Thermal Conductivity Btu hr · ft ² · (°F/in) [6]	Elongation, % [7]	Hardness (R _c , unless noted)	Thermal Conductivity	Linearity	Hysteresis	Creep/Relaxation	Material Cost	Machinability	Hardening Distortion	Corrosion Resistance	Welding or Brazing Suitability		Lot-to-lot Consistency
High-Modulus Alloys (AISI Steels)																			
4140	30	200	6.5	0.283	+400	270	12	42-45	3	8	8	7	9	5	3	1	5	6	very good steel alloy
4340	30	210	6.3	0.283	+500	260	12	43-45	3	8	8	8	8	5	3	1	5	8	excellent steel alloy
18 Ni (250), maraging	27	245	5.6	0.289	+600	140	7-10	48-49	2	8	8	7	4	5	8	2	8	5	good, but seldom used
410 stainless	29	140	6.0	0.280	+400	170	15	39	2	7	7	6	7	4	2	6	2	6	seldom used
630 stainless (17- 4 PH)	28.5	185	6.0	0.280	+400	135	14	41-44	2	7	7	7	6	6	8	7	7	3-4	widely used
631 stainless (17-7 PH)	29	220	5.7	0.276	+400	130	6-7	46-48	2	8	8	7	6	6	8	7	7	5	widely used
632 stainless (PH 15-7 Mo)	29	220	5.0	0.277	+500	110	6	47	2	8	8	8	4	6	8	7	7	5	excellent, but seldom used
S15500 stainless (15-5 PH)	28.5	185	6.0	0.280	+400	135	14	41-44	2	7	7	7	6	6	8	7	7	5-6	improved version of 630
Low-Modulus Alloys																			
2014-T6 alum. alloy	10.6	60	12.4	0.101	+200	1075	10	B 135	8	6	7	6	5	8	9	3	3	6	good
2024-T4/ T351 alum. alloy	10.6	46	12.6	0.101	+200	840	18	B 120	7	6	7	6	5	8	9	3	3	6	good, widely used
2024-T81 alum. alloy	10.6	65	12.6	0.101	+250	1040	8	B 128	8	7	8	7	5	8	9	3	3	6	best of aluminum alloys
6061-T6 alum. alloy	10.0	40	12.9	0.098	+150	1160	14	B 95	8	5	4	4	6	7	8	4	5	5	fair performance
7075-T6 alum. alloy	10.4	70	12.9	0.101	+100	840	10	B 150	7	7	6	6	5	8	8	3	2	5	poor at elevated temperatures
BeCu 25 (C17200)	17	170	9.3	0.298	+250	750	2-3	40-42	7	8	8	8	2	5	9	3	4	7	excellent, but costly
6 Al 4V titanium	16.5	165	4.9	0.160	+300	50	12	40	1	7	7	7	2	3	2	8	4	5	used in special applications only
Miscellaneous Materials																			
AISI 304 stainless steel	28	150	9.6	0.290	+250	110	4-5	39	2	5	4	4	7	3	(B)	8	5	6	poor spring material
Ni-Span-C alloy	28	180	4.3	0.294	+250	90	9	37-38	1	8	8	8	3	3	4	3	5	7	very good, but costly
AZ31B magnesium alloy	6.5	32	14.5	0.064	+100	650	15	B 73	6	3	2	2	6	8	(B)	1	7	5	very poor spring material
Ceramic, Al ₂ O ₃ (99+%)	55	60-70	3.3	0.141	+500	260	(A)	Mohs 9	3	7	8	8	1-3	1	(B)	10	—	7	special applications only
Epoxy-glass laminate (high-pressure, low resin content)	5-7	70-100	5-8	0.06-0.07	100-200	2	—	—	0	5	4	3	5	3	(B)	4	—	3	special, low-accuracy applications only

*The mechanical and physical properties given in this table have been carefully selected from a wide range of sources as representative for typical transducer applications and environments.

[1] for GPa, multiply by 6.9

[2] for MPa, multiply by 6.9

[3] from 75°F to 212°F; for ppm/°C, multiply by 1.8

[4] for g/cm³, multiply by 27.7

[5] transducer applications; for °C, subtract 32 and multiply by 5/9

[6] for watt/m²·°C, multiply by 0.144

[7] in 2-in (51-mm) gauge length

†Numbers tabulated for FIGURE OF MERIT represent relative ratings on a scale of 0 to 10, with higher numbers indicative of more desirable qualities. The ratings are based on experience, judgment, and current practices in the transducer field.

(A) no ductile range

(B) not hardenable by heat treatment

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 3 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

3.2 – TRANSDUTORES DE FORÇA, CÉLULAS DE CARGA

Requisitos específicos

Estabilidade no tempo. Material, SG, adesivo, fiação
Alta rigidez, mínimo efeito sobre o sistema a ser monitorado.
Estabilidade com efeitos outros que a grandeza a medir.
Estabilidade do ponto de zero, drift, e span, no tempo.
Certificada para fadiga.
Linearidade de resposta.
Baixo acoplamento com outros tipos de carregamentos.

Materiais para células de carga

Alto limite elástico.
Baixa histerese.
Pequeno efeito da temperatura.

Metálicos:

Aço 4140, 4340, 15-5 PH
Alumínio 2020 T81, 6061 T6
Ligas Cobre - berílio

Não metálicos:

Cerâmicas, Al_2O_3
Compostos, fibra de carbono com epoxi
Outros, Si, micro-manufaturados

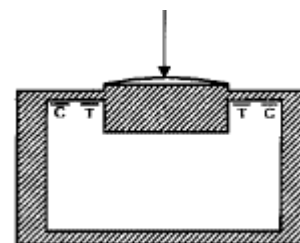
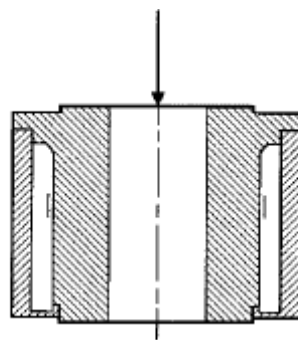
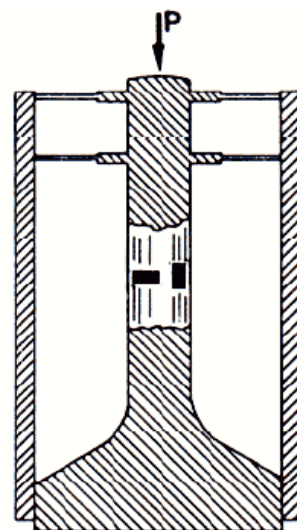
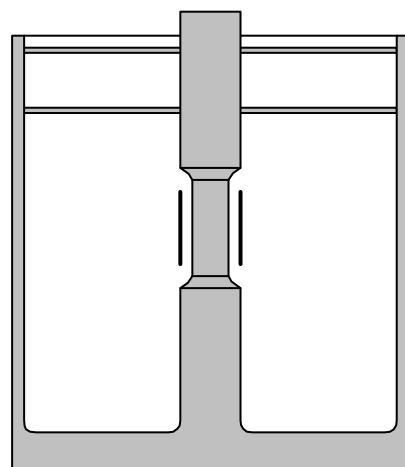
CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 3 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

3.2 – TRANSDUTORES DE FORÇA, CÉLULAS DE CARGA

Tipos de célula de carga, geometria

Tração / compressão

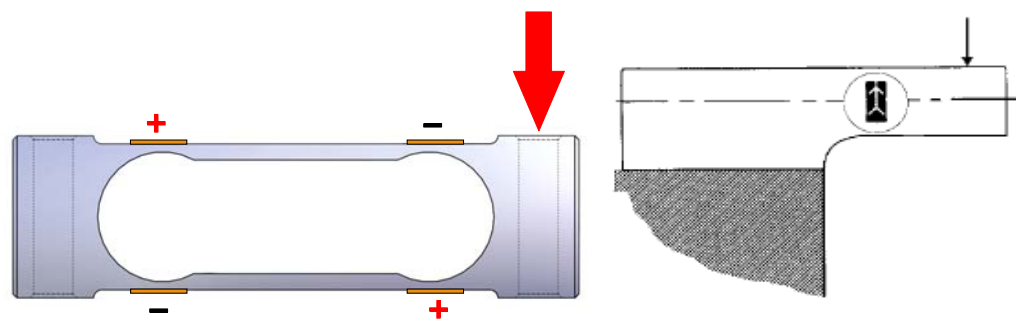
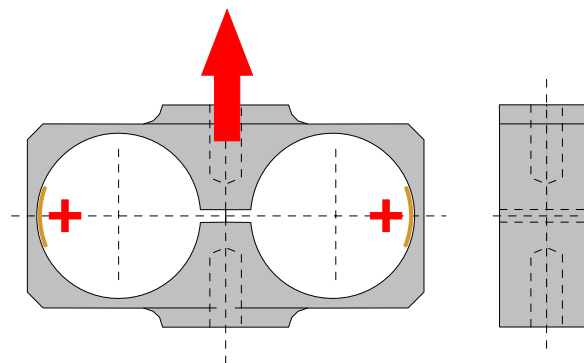


CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 3 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

3.2 – TRANSDUTORES DE FORÇA, CÉLULAS DE CARGA

Tipos de célula de carga, geometria
Flexão

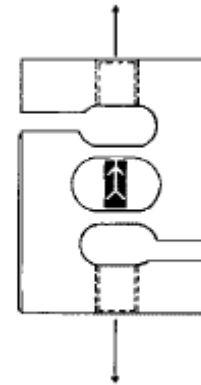
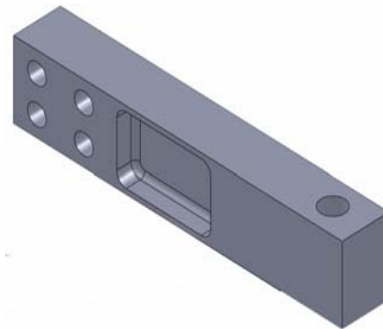


CURSO EXTENSOMETRIA

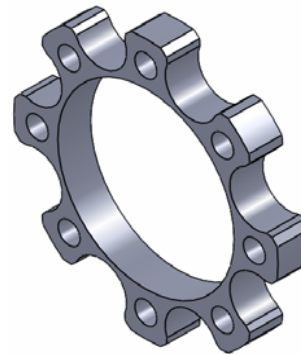
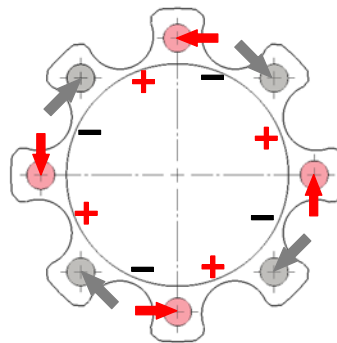
AULA 3 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

3.2 – TRANSDUTORES DE FORÇA, CÉLULAS DE CARGA

Tipos de célula de carga, geometria
Cisalhamento



Tipos de célula de carga, geometria
Torção



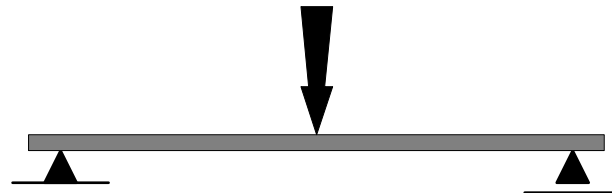
CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 3 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

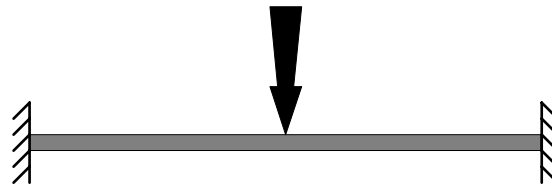
3.2 – TRANSDUTORES DE FORÇA, CÉLULAS DE CARGA

Modelo analítico, comportamento real

Elemento sob flexão, biapoiado ou biengastado



$$\delta = \frac{1}{48} \frac{F \ell^3}{EI}$$



$$\delta = \frac{1}{192} \frac{F \ell^3}{EI}$$

Viga biapoiada tem solicitação máxima no centro;

Condição facilmente obtida, porém apresenta histerese nos apoios. Pontos de zero junto aos apoios.

Viga biengastada. Condição dificilmente obtida na prática.

Os máximos esforços tendem para os apoios. Pontos de zero tendem para posição a 1/4 do vão.

A relação carga-resposta pode ser levantada via calibração, mas o posicionamento não correto dos extensômetros pode comprometer a sensibilidade.

Vale lembrar que, para o caso de viga engastada, a constante numérica para o deslocamento máximo vale 1/3.

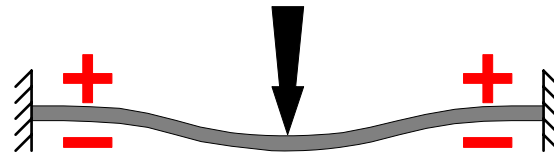
CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 3 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

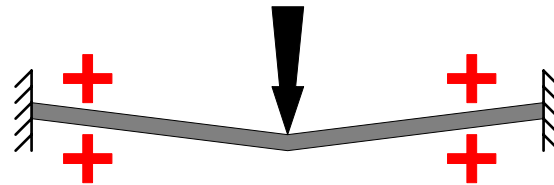
3.2 – TRANSDUTORES DE FORÇA, CÉLULAS DE CARGA

Modelo analítico, comportamento real

Elemento sob flexão, biengastado



$$\delta = \frac{1}{192} \frac{F \ell^3}{EI}$$



$$\delta^3 = \frac{1}{8} \frac{F \ell^3}{EA}$$

Com pequenos deslocamentos ocorre mínimo efeito de membrana. O elemento tem um comportamento de viga, a carga é suportada pelo momento fletor e esforço cortante.

Com grandes deslocamentos as cargas axiais de membrana passam a ser importantes, o elemento deixa de se comportar como viga e tende para um comportamento de cabo sob tração.

Configuração da ponte para flexão;

Configuração da ponte para tração.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 3 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

3.3 – TRANSDUTORES DE DESLOCAMENTO, CLIP-GAGES

Requisitos específicos

Baixa rigidez, mínimo efeito no sistema.

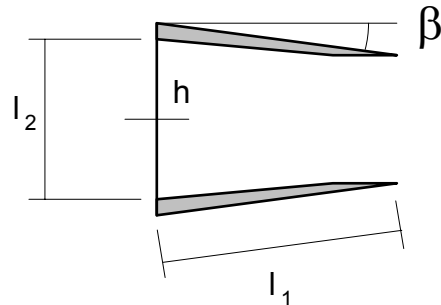
Estabilidade com efeitos outros que a grandeza a medir.

Estabilidade do ponto de zero, drift, e span, no tempo.

Comportamento linear

Formulação

Viga em flexão pura

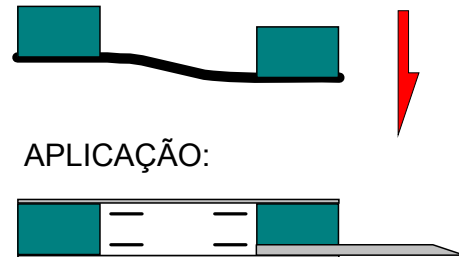


$$\varepsilon = \frac{h\delta}{2\ell_1\ell_2\cos\beta}$$

$$k = \frac{EI}{(\ell_1\cos\beta)^2\ell_2}$$

Viga bi engastada

Equações para uma viga bi engastada.



APLICAÇÃO:

$$\delta = \frac{1}{12} \frac{F\ell^3}{EI}$$

$$\varepsilon = 3 \frac{h\delta}{\ell^2}$$

$$k = 12 \frac{EI}{\ell^3}$$

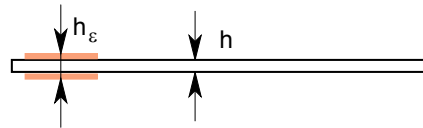
CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 3 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

3.3 – TRANSDUTORES DE DESLOCAMENTO, CLIP-GAGES

Cuidados especiais

Como no caso de transdutores de deslocamento se requer o mínimo de força para ação do sensor, é usual o uso de lâminas bastante finas, da ordem de décimos de milímetro. Como o extensômetro é colado sobre a superfície da lâmina, para essa ordem de grandeza de espessura a distância da grade do extensômetro até a linha neutra pode ser bastante diversa da meia espessura da lâmina. Assim a deformação no extensômetro deve ser calculada usando uma espessura efetiva, h_ϵ , e não a geométrica, h .



$$\epsilon = \frac{h}{2\rho}, \text{ e } \epsilon = \frac{h_\epsilon}{2\rho}$$

Exemplo

Clip-gage com elemento sensor fabricado com CuBe de 0,005" de espessura, trabalhando sob flexão, raio de curvatura de 60 mm. São usados dois extensômetros do tipo XX, para formar uma ponte completa. A espessura do material da base dos extensômetros é de 0,045 mm e a espessura da grade é de 0,005 mm.

Pela geometria $h=0,127$ mm, $\epsilon=0,00106$. Considerando agora a espessura dos extensômetros, $h_\epsilon=0,222$ mm, $\epsilon=0,00185$.

Isto corresponde a uma diferença de 75% a mais. Deve, no entanto, ser lembrado que nestes casos o extensômetro passa a ter um considerável efeito de aumento local da rigidez, o que diminui o raio de curvatura e logo a deformação medida. O resultado final da superposição dos dois efeitos só pode ser obtido via calibração do clip-gage.

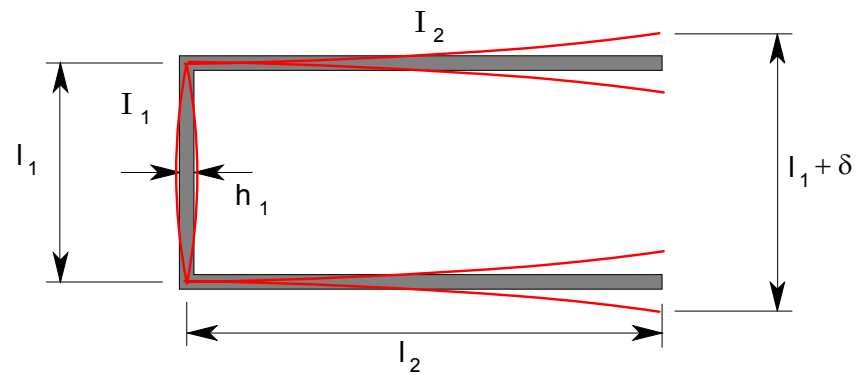
CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 3 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

3.3 – TRANSDUTORES DE DESLOCAMENTO, CLIP-GAGES

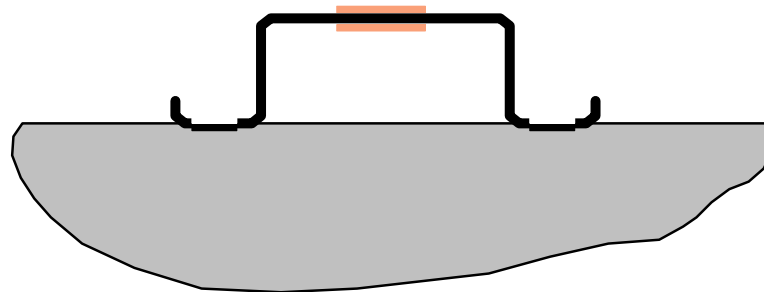
Formulação

Pórtico flexível.



$$\varepsilon = \frac{h_1 \delta}{2} \cdot \left[\ell_1 \ell_2 + \frac{2}{3} \ell_2^2 \frac{I_1}{I_2} \right]^{-1} \quad k = E \cdot \left[\frac{\ell_1 \ell_2^2}{I_1} + \frac{2}{3} \frac{\ell_2^3}{I_2} \right]^{-1}$$

Clip-gage soldável para grandes deslocamentos.



CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 3 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

3.3 – TRANSDUTORES DE DESLOCAMENTO, CLIP-GAGES

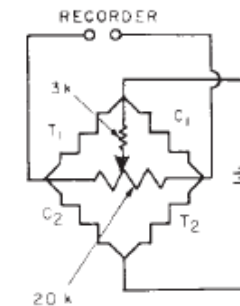
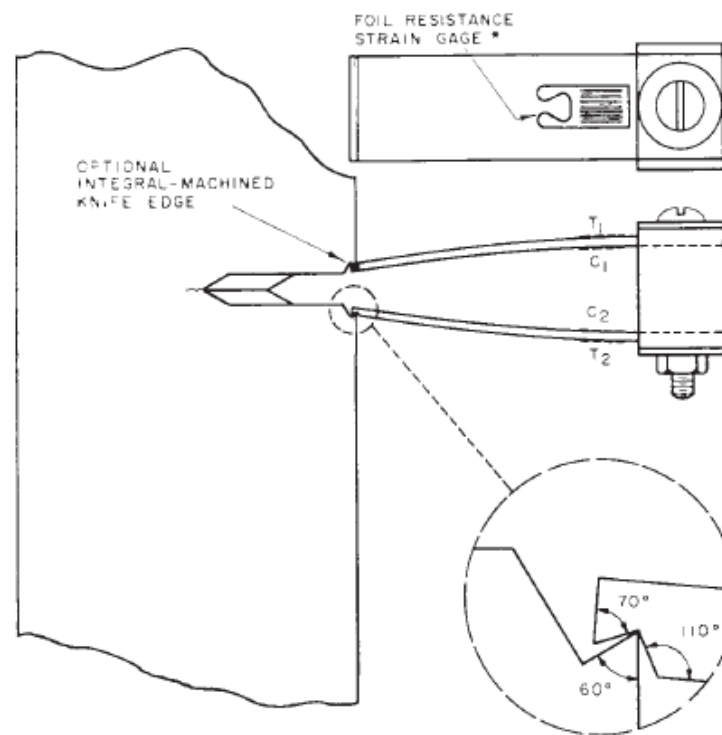


Designation: E 399 – 90 (Reapproved 1997)

Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials¹



E 399 – 90 (1997)



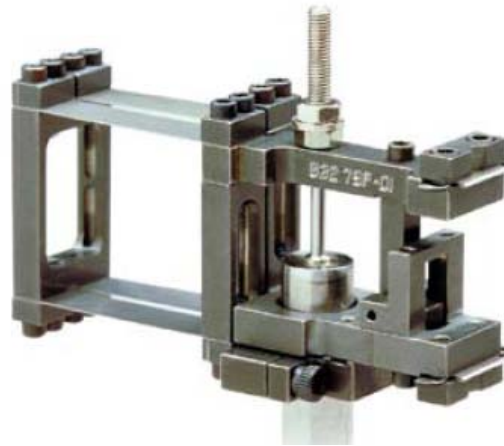
* 500 OHM GAGES WILL PROVIDE GREATER SENSITIVITY THAN 120 OHM GAGES

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 3 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

3.3 – TRANSDUTORES DE DESLOCAMENTO, CLIP-GAGES

Clip gage axial



Clip gage diametral

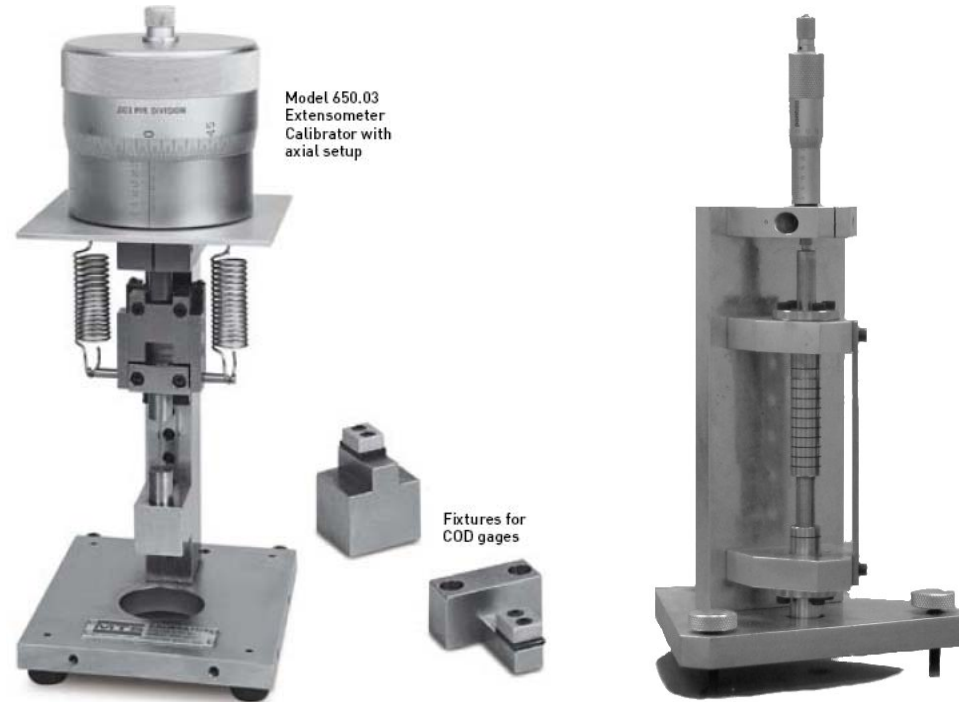


CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 3 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

3.3 – TRANSDUTORES DE DESLOCAMENTO, CLIP-GAGES

Calibração de clip-gages

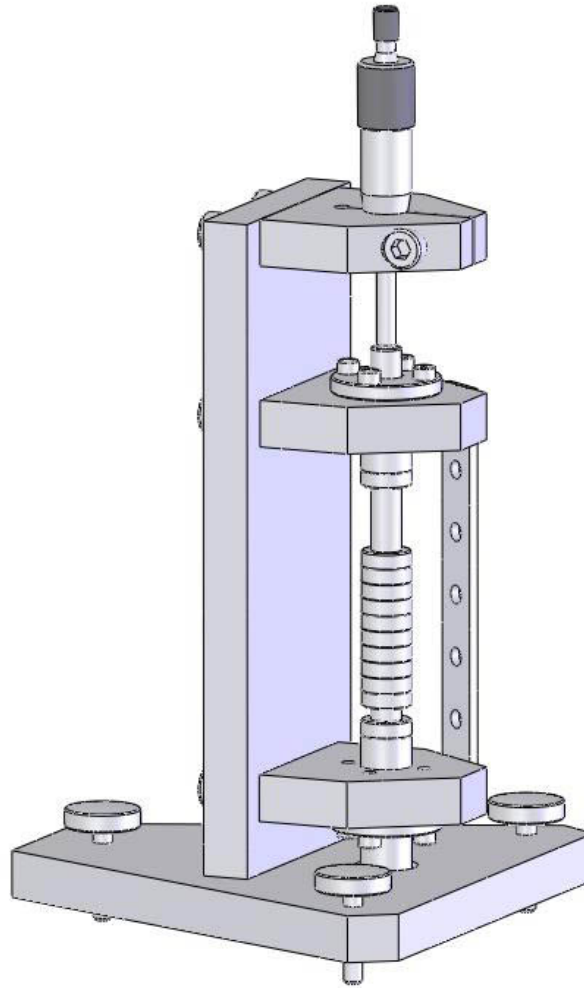


CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 3 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

3.3 – TRANSDUTORES DE DESLOCAMENTO, CLIP-GAGES

Calibração de clip-gages



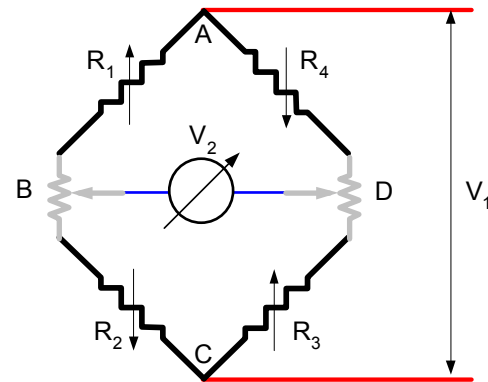
CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 3 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

3.4 – CIRCUITOS DE COMPENSAÇÃO

Compensação de zero

O ajuste do ponto de zero é feito em duas partes, uma do zero na temperatura ambiente, com um resistor ajustável de pequeno TCR, e outra para compensar o efeito da temperatura com outro resistor, este com alto TCR.



Resistor ajustável

Resistor de baixo TCR para ajuste inicial do ponto de zero.
Materiais de baixo TCR: Constantan, Manganina.

Resistor de alto TCR para compensação de temperatura do ponto de zero.

Materiais de alto TCR: Cobre, níquel, Balco.

O resistor de ajuste do zero da ponte, quando em série com os extensômetros, deve ter uma resistência muito menor que a dos mesmos, $R_0 \ll R_g$.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 3 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

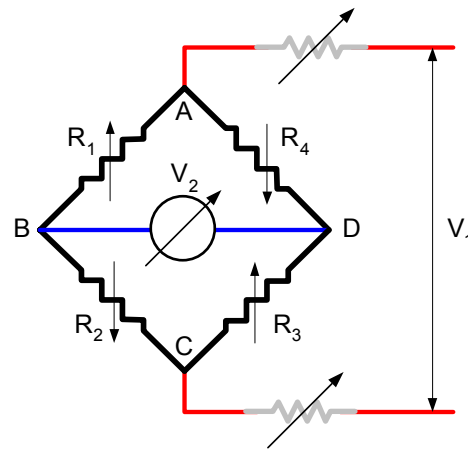
3.4 – CIRCUITOS DE COMPENSAÇÃO

Compensação de spam

Nas células de carga o efeito da temperatura sobre o módulo de elasticidade do material deve ser compensado.

São usados resistores com TCR elevado, reduzindo assim a tensão de alimentação da ponte com o aumento de temperatura.

Os resistores de spam têm uma resistência similar à dos extensômetros, em geral da ordem de $30\ \Omega$ a $70\ \Omega$.



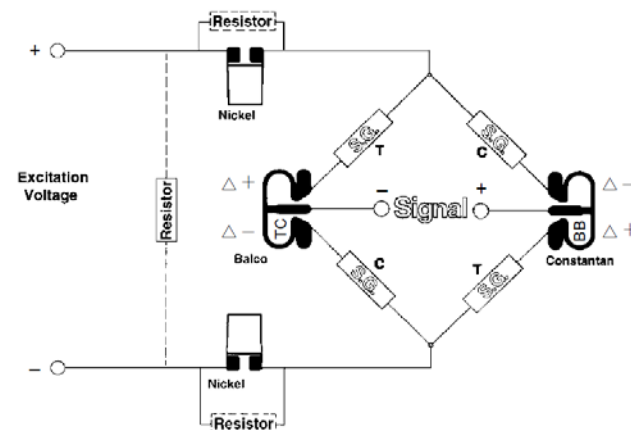
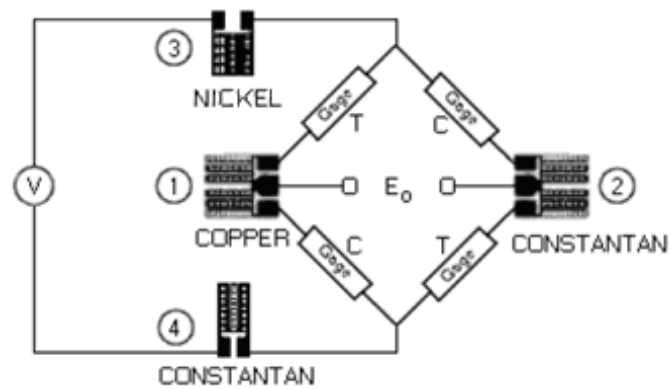
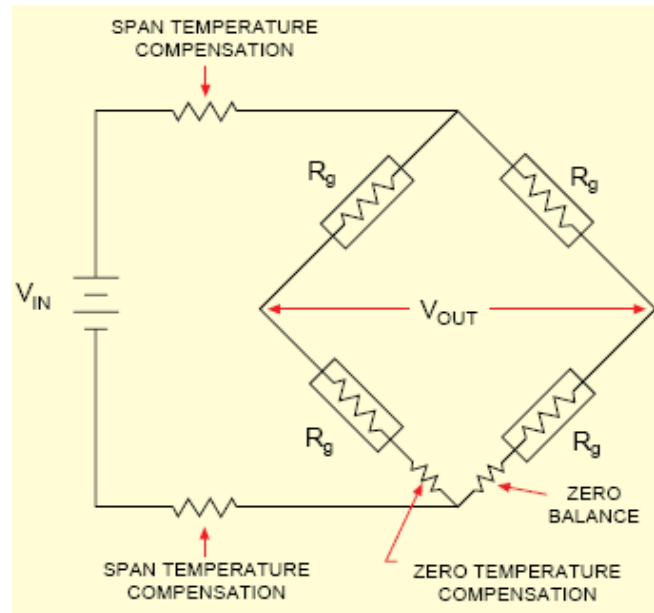
Dados de TCE e TCR em ppm / K

	Al	CuBe	Aço	17.4PH	Ni	Cu	Balco	CuNi	Mang.
TCE	-540	-450	-230	-270					
TCR					5900	3930	4300	5	20

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 3 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

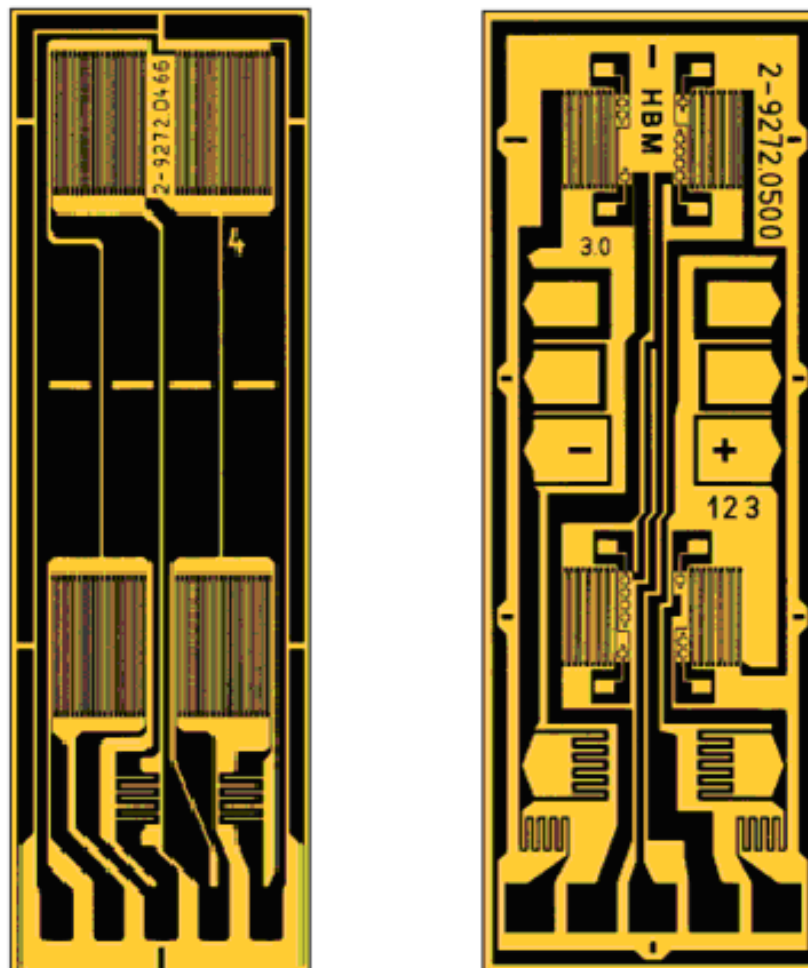
3.4 – CIRCUITOS DE COMPENSAÇÃO



CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 3 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

3.4 – CIRCUITOS DE COMPENSAÇÃO



CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 3 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

3.4 – CIRCUITOS DE COMPENSAÇÃO

A compensação de um transdutor, seja o ajuste do zero, bem como a correção de spam com a temperatura, no caso de sensores que direta ou indiretamente dependem de forças e momentos para gerar deformação, pode ser feita de duas maneiras.

Por hardware.

É o processo tradicional, como descrito até o momento. Tem a vantagem de ser um processo relativamente simples de executar, porém exige componentes de alta qualidade, de grande estabilidade no tempo e muito pouco efeito da temperatura.

Por software

É um processo mais recente, no qual quando da calibração do transdutor as curvas de correção, zero e spam, são ajustadas por funções polinomiais, cujos coeficientes são então embutidos junto ao transdutor, fazendo assim o ajuste de forma automática.

A norma IEEE 1451.4 padroniza as informações para sensores analógicos, Transducer Electronic Data Sheet (TEDS), que reside em um chip interno ao sensor, contendo todas suas informações. Tipicamente a TEDS é formada por informações básicas, tabela a seguir, e por templates específicos para cada tipo de sensor.

INFORMAÇÃO	COMPRIMENTO EM BITS
Manufacturer ID	14
Model Number	15
Version Letter	5
Version Number	6
Serial Number	24

CURSO EXTENSOMETRIA

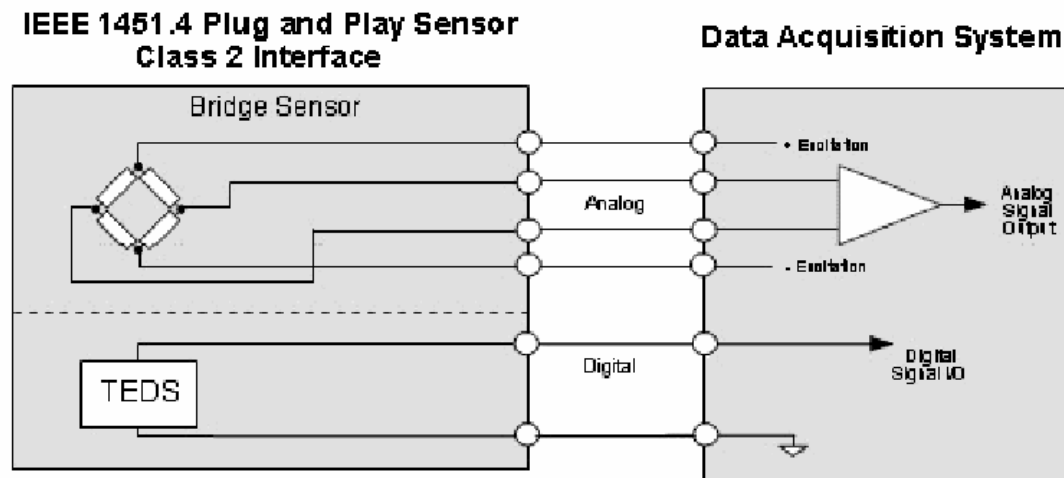
AULA 3 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

3.4 – CIRCUITOS DE COMPENSAÇÃO

TEDS - Comunicação transdutor-sistema de aquisição

A especificação permite que ocorra a comunicação tradicional do transdutor com o sistema de aquisição, de forma analógica, mas simultaneamente as informações do data sheet contidas no chip TEDS ficam disponíveis para o SCAD.

Caso o SCAD receba também informações da temperatura na qual se encontra o transdutor, a sua curva de calibração com a temperatura pode ser usada.



CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 3 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

3.4 – CIRCUITOS DE COMPENSAÇÃO

TEDS - Bridge Sensors Template - ID 33

Select	Property	Description	Access	Bits	Data Type (and Range)	Units
–	TEMPLATE	Template ID	–	8	Integer (value = 33)	–
–	%ElecSigType	Electrical signal type	ID	-	Assign = 3, "Bridge Sensor"	–
Select Case – Selects Type of Physical Measurand (Units)				6	Select Case	–
Cases 0 - 45	%MinPhysVal	Minimum physical value	CAL	32	Single	Various*
	%MaxPhysVal	Maximum physical value	CAL	32	Single	Various*
Select Case – Selects Full-Scale Electrical Value Precision				2	Select Case	–
Case 0 (11 bits)	%MinElecVal	Minimum electrical output	CAL	11	ConRes ($\pm 1\text{E-}3$, step $1\text{E-}6$)	V/V
	%MaxElecVal	Maximum electrical output	CAL	11	ConRes ($\pm 1\text{E-}3$, step $1\text{E-}6$)	V/V
Case 1 (19 bits)	%MinElecVal	Minimum electrical output	CAL	19	ConRes ($\pm 6.55\text{E-}3$, step $25\text{E-}9$)	V/V
	%MaxElecVal	Maximum electrical output	CAL	19	ConRes ($\pm 6.55\text{E-}3$, step $25\text{E-}9$)	V/V
Case 2 (32 bits)	%MinElecVal	Minimum electrical output	CAL	32	Single	V/V
	%MaxElecVal	Maximum electrical output	CAL	32	Single	V/V
–	%MapMeth	Mapping Method	ID	-	Assign = 0, "Linear"	–
–	%BridgeType	Bridge type	ID	2	Enumeration: Quarter Half Full	–
–	%SensorImped	Bridge element impedance	ID	18	ConRes (1 to 26.2k, step 0.1)	Ohms
–	%RespTime	Response time	ID	6	ConRelRes ($1\text{E-}6$ to 7.9, $\pm 15\%$)	seconds
–	%ExciteAmplNom	Excitation level, nominal	ID	9	ConRes (0.1 to 51.1, step 0.1)	Volts
–	%ExciteAmplMin	Excitation level, min.	ID	9	ConRes (0.1 to 51.1, step 0.1)	Volts
–	%ExciteAmplMax	Excitation level, max.	ID	9	ConRes (0.1 to 51.1, step 0.1)	Volts
–	%CalDate	Calibration date	CAL	16	DATE	–
–	%CalInitials	Calibration initials	CAL	15	CHR5	–
–	%CalPeriod	Calibration period	CAL	12	UNINT	days
–	%MeasID	Measurement location ID	USR	11	UNINT	–

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 3 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

3.4 – CIRCUITOS DE COMPENSAÇÃO

TEDS - Strain Gages Template - ID 35

Property	Description	Access	Bits	Data Type (and Range)	Units
TEMPLATE	Template ID		8	Integer (value = 35)	–
%ElecSigType	Transducer electrical signal type	ID	–	Assign = 3, “Bridge Sensor”	–
%MinPhysVal	Negative full-scale strain	CAL	14	ConRes (-0.4 to 0.4, step 50E-6)	strain
%MaxPhysVal	Positive full-scale strain	CAL	14	ConRes (-0.4 to 0.4, step 50E-6)	strain
%MinElecVal	Minimum electrical output	CAL	14	ConRes (-1 to 1, step 125E-6)	V/V
%MaxElecVal	Maximum electrical output	CAL	14	ConRes (-1 to 1, step 125E-6)	V/V
%MapMeth	Mapping method	ID	–	Assign = 6, “Bridge”	–
%GageType	Gage Type	ID	5	Enumeration of gage configurations	–
%GageFactor	Gage Factor	CAL	13	ConRelRes (1.5 to 1500, $\pm 0.0422\%$)	–
%GageTransSens	Transverse Sensitivity	CAL	9	ConRes(-5 to 5, step 0.02)	%
%GageOffset	Zero offset after installation	USR	20	ConRes (-50E-3 to 50E-3, step 100E-9)	V/V
%PoissonCoef	Poisson coefficient after installation	USR	14	ConRes (0 to 1, step 1E-4)	–
%YoungsMod	Young’s Modulus	USR	14	ConRes (0 to 1.6E+12, step 100E+6)	Pa
%GageArea	Area of each gage element	ID	7	ConRelRes(0.2 to 3250, $\pm 4\%$)	mm ²
%BridgeType	Type of bridge	ID	2	Quarter, half, or full bridge	–
%SensorImped	Resistance of each bridge element	ID	13	ConRelRes (50 to 7.9k, $\pm 0.0328\%$)	Ohms
%RespTime	Response time	ID	6	ConRelRes (1E-6 to 7.9, $\pm 15\%$)	Seconds
%ExciteAmplNom	Excitation voltage, nom.	ID	8	ConRes (0.1 to 25.5, step 0.1)	Volts
%ExciteAmplMax	Excitation voltage, max.	ID	8	ConRes (0.1 to 25.5, step 0.1)	Volts
%CalDate	Calibration date	CAL	16	DATE	–
%CalInitials	Calibration initials	CAL	15	CHR5	–
%CalPeriod	Calibration period	CAL	12	UNIINT	days
%MeasID	Measurement location ID	USR	11	UNINT	–

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 3 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

3.4 – CIRCUITOS DE COMPENSAÇÃO

TEDS - Calibration Table Template - ID 40

Dados de calibração na forma de pares de pontos, até 127.

Property	Description	Bits	Data Type (and Range)
TEMPLATE	Template ID	8	Integer (value = 40)
%CalTable_Domain	Domain parameter	1	Electrical or physical
STRUCTARRAY CalTable	Number of data pairs (n)	7	Size from 1 to 127
%CalPoint_DomainValue (0)	Domain Cal Point 0 (% of full span)	16	ConRes (0 to 100%, step 0.0015)
%CalPoint_RangeValue (0)	Range Cal Deviation 0 (% of full span)	21	ConRes (-100 to 100, step 1E-4)
%CalPoint_DomainValue (1)	Domain Cal Point 1 (% of full span)	16	ConRes (0 to 100%, step 0.0015)
%CalPoint_RangeValue (1)	Range Cal Deviation 1 (% of full span)	21	ConRes (-100 to 100, step 1E-4)
...	...		...
%CalPoint_DomainValue (n)	Domain Cal Point n (% of full span)	16	ConRes (0 to 100%, step 0.0015)
%CalPoint_RangeValue (n)	Range Cal Deviation n (% of full span)	21	ConRes (-100 to 100, step 1E-4)

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 3 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

3.4 – CIRCUITOS DE COMPENSAÇÃO

TEDS - Calibration Curve Template - ID 41

Dados de calibração na forma de curvas polinomiais ajustadas

Property/Command		Description	Bits	Data Type (and Range)
TEMPLATE		Template ID	8	Integer (value = 41)
%CalCurve_Domain		Domain parameter	1	Electical or Physical
STRUCTARRAY CalCurve		Number of Cal Curve Segments	8	Dimension size of 1 to 255
%CalCurve_PieceStart (0)		Start of segment 0 (% of FS)	13	ConRes (0 to 100, step 0.01)
	STRUCTARRAY CalCurve_Poly (0)	Num. of polynomials for segment 0	7	Dimension size of 1 to 127
	%CalCurve_Power (array)	Power of domain value	7 per value	ConRes (-32 to 32, step 0.5)
	%CalCurve_Coef (array)	Polynomial coefficients	32 per value	Single
	STRUCTARRAY CalCurve_Poly (1)	Num. of polynomials for segment 1	7	Dimension size of 1 to 127
	%CalCurve_Power (array)	Power of domain value	7 per value	ConRes (-32 to 32, step 0.5)
	%CalCurve_Coef (array)	Polynomial coefficients	32 per value	Single
...		...		...
	STRUCTARRAY CalCurve_Poly (n)	Num. of polynomials for segment n	7	Dimension size of 1 to 127
	%CalCurve_Power (array)	Power of domain value	7 per value	ConRes (-32 to 32, step 0.5)
	%CalCurve_Coef (array)	Polynomial coefficients	32 per value	Single

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 3 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

3.5 – TIPOS DE CÉLULAS DE CARGA, CIRCUITO DA PONTE

Tração / compressão

Circuito a 2X e 2Y, com ponte completa.

Circuito com 4X e 4Y, ponte completa com 2 SG por braço.

Circuito com 4X em meia ponte diagonal.

Flexão

Ponte completa com 2X e 2Y, em um mesmo lado da viga.

Ponte completa com 4X, dois em cada lado da viga.

Ponte completa com 2 SG por braço, usando 8X.

Cisalhamento

Meia ponte com SG $\pm 45^\circ$.

Ponte completa com 2 SG $\pm 45^\circ$.

Torção

Meia ponte com SG $\pm 45^\circ$.

Ponte completa com 2 SG $\pm 45^\circ$.

Referência

Bridge Conections, Kyowa

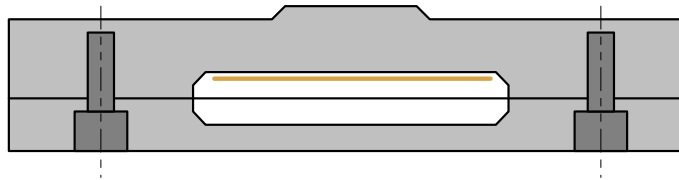
CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 3 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

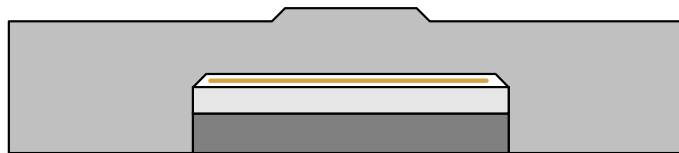
3.5 – TIPOS DE CÉLULAS DE CARGA, CIRCUITO DA PONTE

Célula de carga de compressão.

Versão 1



Versão 2



Célula de carga para 20 kN, 10 mm de altura e 38 mm de diâmetro. Operação a 120°C.

Primeira solução com estrutura dividida apresenta muita histerese devido ao atrito na junta. O aperto dos parafusos afeta também o ponto de zero da célula. A junta está muito próxima do elemento sensor e afeta diretamente nas medidas.

Segunda solução, integral, afasta estes problemas. É usada uma lâmina de borracha de silicone entre o extensômetro e a base, formada por resina epóxi resistente a altas temperaturas.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 3 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

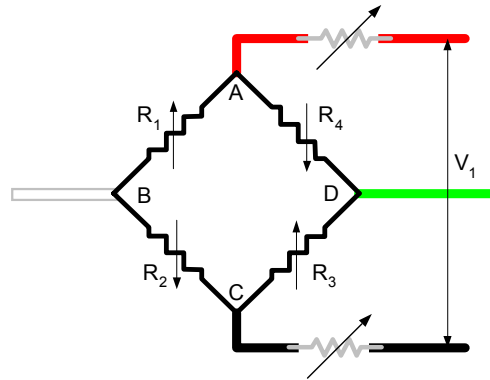
3.5 – TIPOS DE CÉLULAS DE CARGA, CIRCUITO DA PONTE

Exemplo.

Uma célula de carga de 50 kN apresentou defeito. A medida da resistência elétrica entre os diferentes cabos da fiação da célula (preto, vermelho, verde, branco) apresentou os seguintes resultados:

Combinação	B-G	B-R	B-W	G-R	G-W	W-R
Leitura	389 Ω	780 Ω	1093 Ω	391 Ω	704 Ω	391 Ω

Considerando que a ponte tenha resistores de compensação de spam, a figura abaixo apresenta o esquema da mesma.



A partir das leituras feitas chega-se à conclusão de que a fiação em R_2 está rompida em algum ponto, ou o próprio extensômetro está aberto. Os demais valores são:

R_1	R_3	R_4	R_{spam}
352 Ω	350 Ω	352 Ω	39 Ω

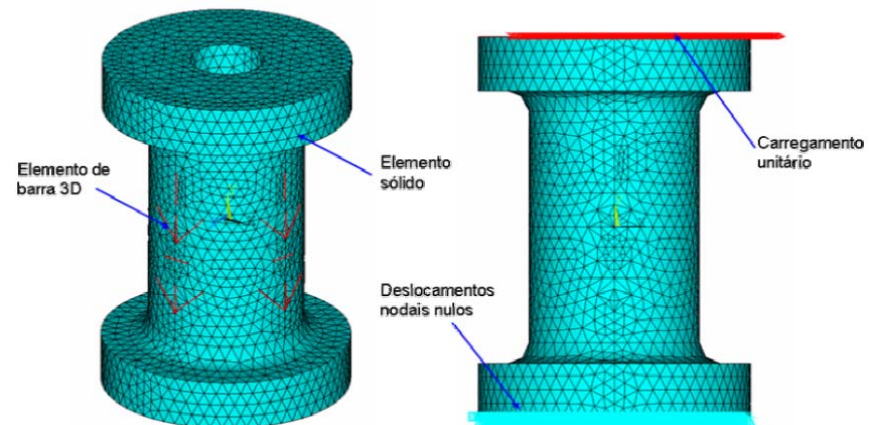
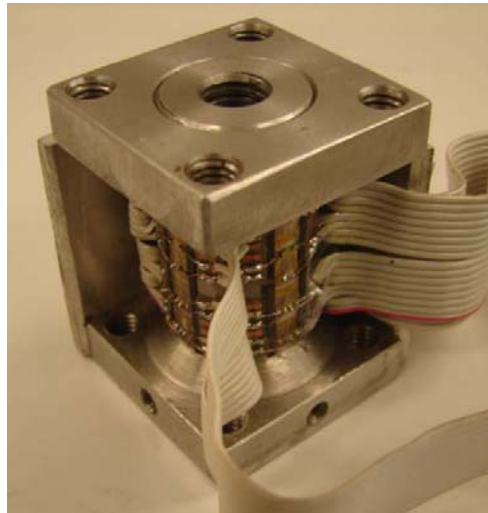
Por simetria muito provavelmente $R_2 = 350 \Omega$.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 3 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

3.5 – TIPOS DE CÉLULAS DE CARGA, CIRCUITO DA PONTE

Célula de carga de seis eixos



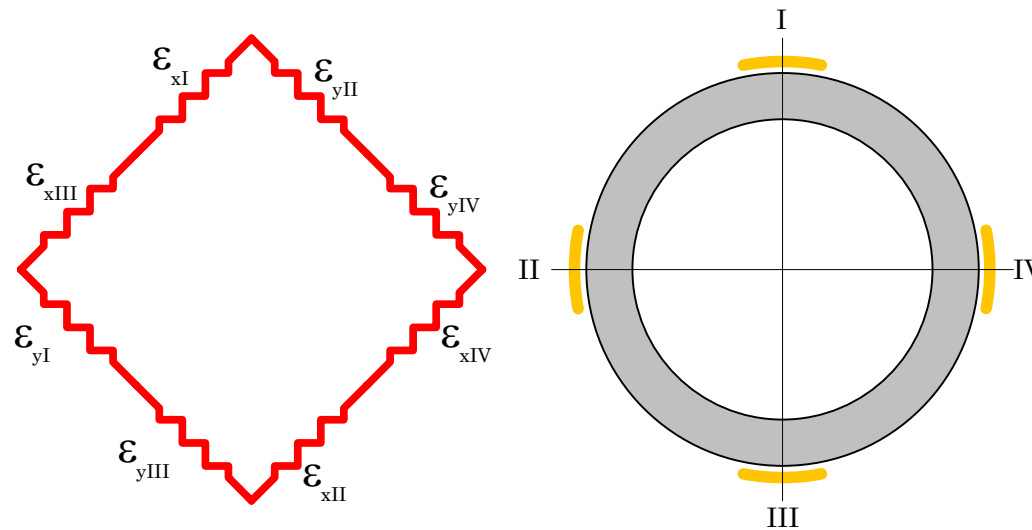
CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 3 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

3.5 – TIPOS DE CÉLULAS DE CARGA, CIRCUITO DA PONTE

Célula de carga de seis eixos

Uso de extensômetros em série, em cada braço da ponte. São colocados em lados diametralmente opostos da célula de carga. Elimina efeitos de excentricidade da carga e aumenta a resistência efetiva da ponte.



Quatro extensômetros XY; carga axial;

Quatro extensômetros ZZ; carga de torção;

Quatro extensômetros XX; momentos fletores;

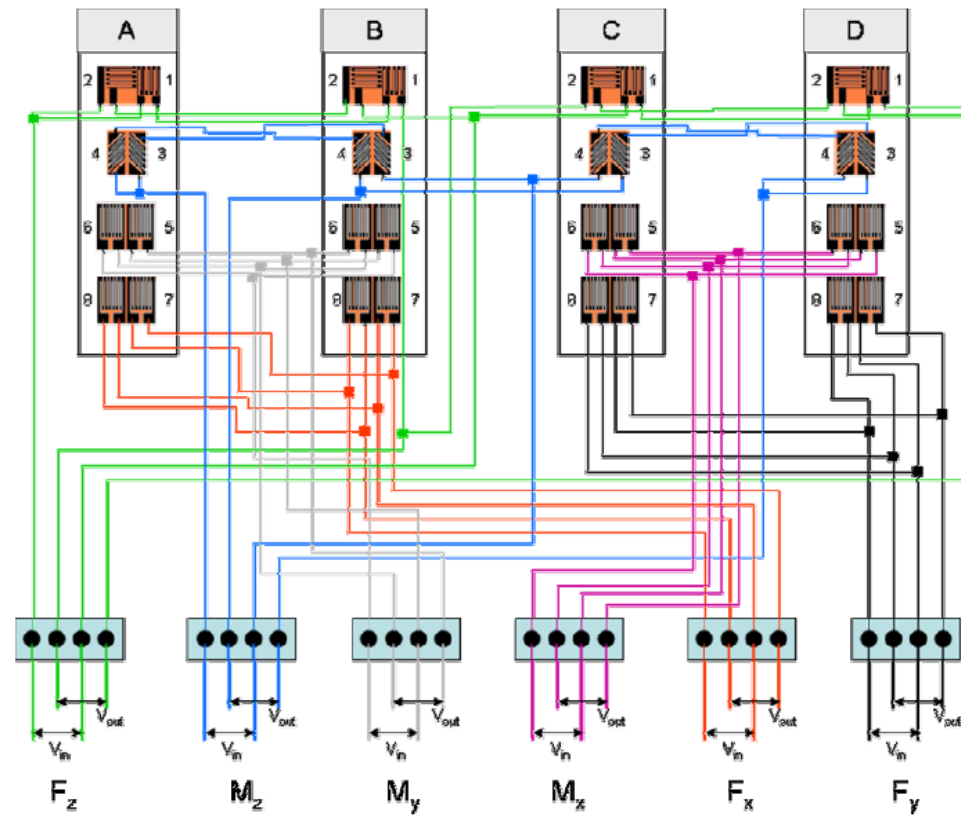
Quatro extensômetros XX; cargas transversais.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 3 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

3.5 – TIPOS DE CÉLULAS DE CARGA, CIRCUITO DA PONTE

Célula de carga de seis eixos
Circuito interno

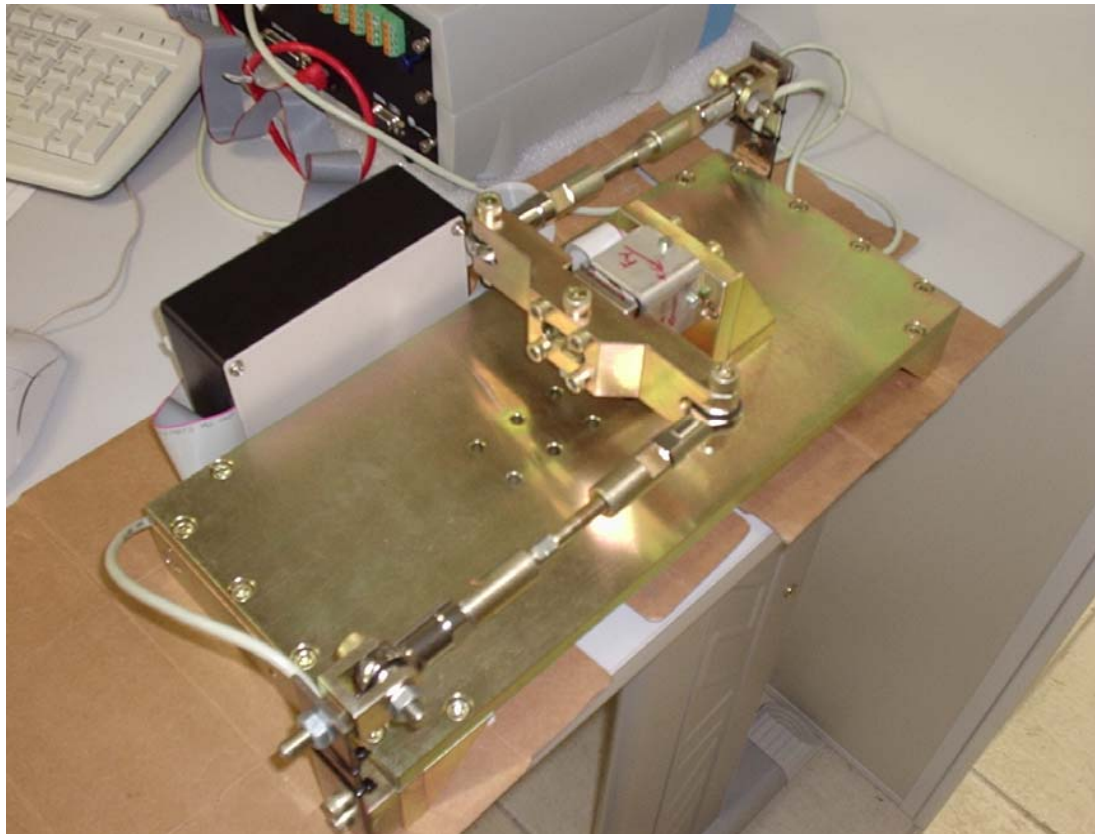


CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 3 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

3.5 – TIPOS DE CÉLULAS DE CARGA, CIRCUITO DA PONTE

Célula de carga de seis eixos
Calibração



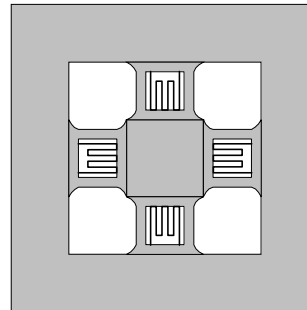
CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 3 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

3.6 – OUTROS TIPOS DE TRANSDUTORES

Aceleração

Acelerômetro micro fabricado com vigas suportando uma massa sísmica, com SG gerados por deposição direta sobre as superfícies. Ajuste da ponte por remoção seletiva a laser.



Medida indireta

- Standard strain ring
- Simple strain measurements on shafts, axles and cylinders
- Installation without surface preparation
- 1% Accuracy
- For tension, compression, bending or torque measurements
- For cyclical applications only, i.e. clamping force on presses



CURSO EXTENSOMETRIA

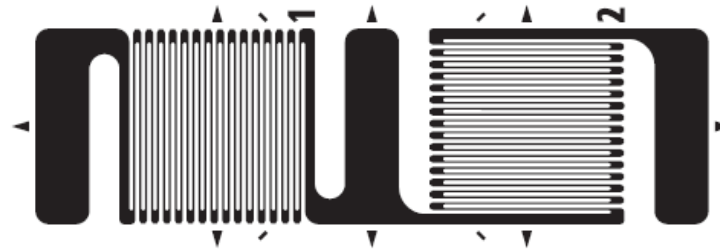
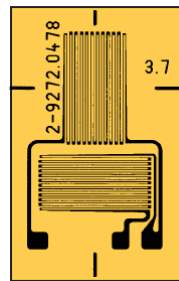
AULA 3 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

3.6 – OUTROS TIPOS DE TRANSDUTORES

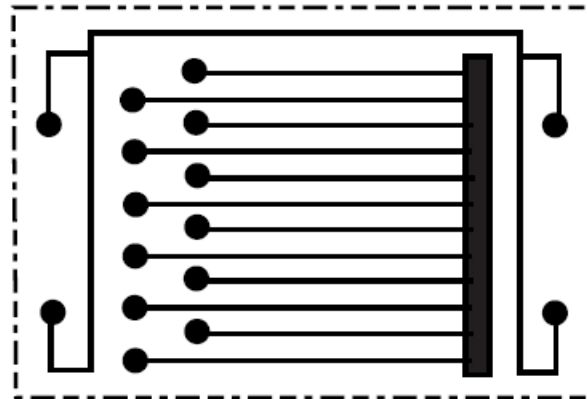
Fadiga

Nucleação, cálculo do dano acumulado.

A resistência do SG muda com o número de ciclos.



Propagação, acompanhamento do tamanho da trinca.



CURSO EXTENSOMETRIA

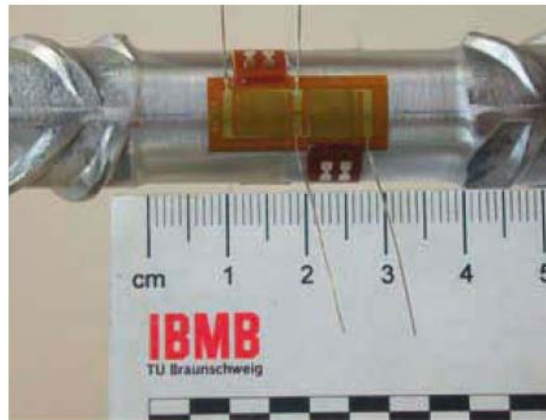
AULA 3 - USO DE STRAIN GAGES EM TRANSDUTORES

3.6 – OUTROS TIPOS DE TRANSDUTORES

Medida de esforços em pontes, viadutos, barragens, em tempo real.

Monitoramento das reais condições de operação da estrutura.

Uso em estruturas aeronáuticas, avaliação de dano.



Barras de reforço do concreto instrumentadas para funcionar como sensores durante toda a vida da estrutura.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

Campo de tensões e deformações

Solução elástica para deformações

Solução elástica para tensões

Círculo de Mohr para tensão e deformação

Estado plano de tensões

Solução para deformações

Solução para tensões

Casos de tensões ou deformações proporcionais

Deformações em direções arbitrárias

Formulação geral

Direção de deformação zero, estado uniaxial biaxial

Estudo de casos

Formulação para $1/4$, $1/2$, $1/4 + 1/4$, $4/4$

Tração, flexão

Cisalhamento, torção

Efeito de concentração de tensão

Definição elástica

Gradiente de tensões

Solução no campo plástico

Análise de rosetas

Roseta 0-90 e roseta ± 45

Roseta 0-45-90 e roseta 0-60-120

Estudo de tensões residuais

Método do furo cego

Controle de qualidade

Ponte de Wheatstone na análise de tensões

Formulação $1/4$ de ponte a três fios

Calibração dos extensômetros

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.1 – CAMPO DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES

Solução elástica para deformações

$$\varepsilon_i = \frac{1}{E} \left[\sigma_i - \nu (\sigma_j + \sigma_k) \right]$$

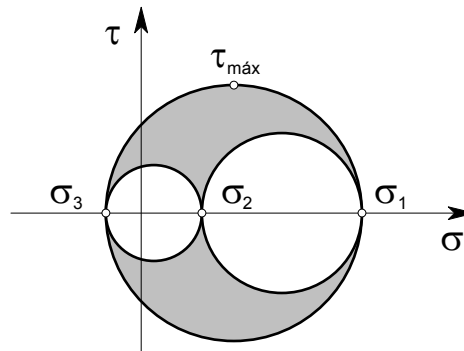
$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{E} \sigma_{ij} (1 + \nu) \quad ; \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \gamma_{ij}$$

Solução elástica para tensões

$$\sigma_i = \frac{E}{1 + \nu} \left[\varepsilon_i + e \frac{\nu}{1 - 2\nu} \right] \quad ; \quad e = \varepsilon_{ii} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$$

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1 + \nu} \varepsilon_{ij}$$

Círculo de Mohr para tensão

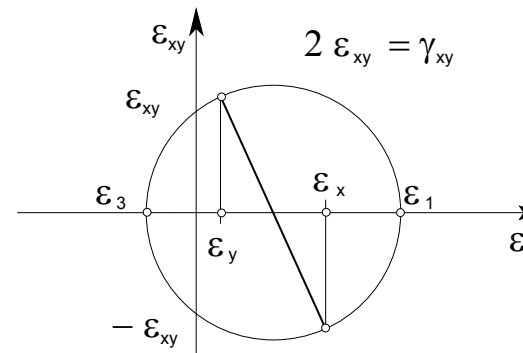
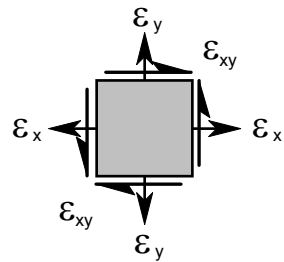
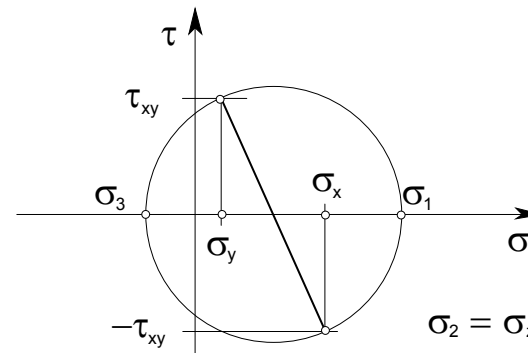
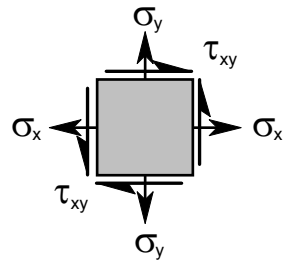


CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.1 – CAMPO DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES

Círculo de Mohr para tensão e deformação



CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.2 – CASOS PARTICULARES DO ESTADO DE TENSÕES

ESTADO UNIAXIAL

Lei de Hooke elementar,

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \sigma_x$$

Efeito de Poisson,

$$\varepsilon_y = \varepsilon_z = -\nu \cdot \varepsilon_x$$

No caso de anisotropia elástica,

$$\varepsilon_y = -\nu_{xy} \cdot \varepsilon_x \quad ; \quad \varepsilon_z = -\nu_{xz} \cdot \varepsilon_x$$

ESTADOS BIAXIAIS

Estado plano de deformações - EPD;

Deformações não nulas são as que estão num mesmo plano

$$\varepsilon_x \neq 0; \quad \varepsilon_y \neq 0; \quad \varepsilon_z = 0$$

$$\gamma_{xy} \neq 0; \quad \gamma_{xz} = 0; \quad \gamma_{yz} = 0$$

Estado plano de tensões - EPT;

Tensões não nulas são as que estão num mesmo plano

$$\sigma_x \neq 0; \quad \sigma_y \neq 0; \quad \sigma_z = 0$$

$$\tau_{xy} \neq 0; \quad \tau_{xz} = 0; \quad \tau_{yz} = 0$$

Estado quase plano de deformações - EQPD.

É o caso prático mais próximo de um EPD.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.2 – CASOS PARTICULARES DO ESTADO DE TENSÕES

ESTADO TRIAXIAL

Lei de Hooke generalizada.

Caso geral, engloba todos os outros casos.

Solução elástica para deformações

$$\varepsilon_i = \frac{1}{E} \left[\sigma_i - \nu (\sigma_j + \sigma_k) \right]$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{E} \sigma_{ij} (1 + \nu) \quad ; \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \gamma_{ij} \quad ; \quad (i \neq j)$$

Solução elástica para tensões

$$\sigma_i = \frac{E}{1 + \nu} \left[\varepsilon_i + \nu \frac{\varepsilon_j + \varepsilon_k}{1 - 2\nu} \right]$$

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1 + \nu} \varepsilon_{ij} \quad ; \quad \sigma_{ij} = \frac{1}{2} \gamma_{ij} \quad ; \quad (i \neq j)$$

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.2 – ESTADO PLANO DE DEFORMAÇÕES

O EPD é uma situação mais conceitual, de uma condição limite que na prática é dificilmente realizada, pela dificuldade de garantir deformação absolutamente zero numa dada direção, considerando $\varepsilon_z = 0$.

No caso de estruturas com grande espessura de material, o EQPD é uma solução mais realista.

Solução para tensões

$$\sigma_x = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} [\varepsilon_x + \nu(\varepsilon_y - \varepsilon_x)]$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} [\varepsilon_y + \nu(\varepsilon_x - \varepsilon_y)]$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$$

Solução para deformações

$$\varepsilon_z = 0; \quad \gamma_{xz} = 0; \quad \gamma_{yz} = 0$$

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] ; \quad \varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] ; \quad e = \varepsilon_x + \varepsilon_y$$

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x(1-\nu^2) - \sigma_y(\nu+\nu^2)] ; \quad \varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y(1-\nu^2) - \sigma_x(\nu+\nu^2)] ;$$

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.2 – ESTADO PLANO DE TENSÕES

O caso de um EPT, ao contrário do EPD, é uma situação bastante comum, de grande aplicação para os problemas de extensometria. Considera-se $\sigma_z = 0$.

Solução para deformações

$$\varepsilon_z = -\frac{\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y)$$

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}[\sigma_x - \nu \cdot \sigma_y]$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}[\sigma_y - \nu \cdot \sigma_x]$$

$$e = \frac{1-2\nu}{1-\nu}(\varepsilon_x + \varepsilon_y)$$

Solução para tensões

$$\sigma_z = \frac{E}{1+\nu} \left[\varepsilon_z + e \frac{\nu}{1-2\nu} \right] = 0$$

$$\varepsilon_z = -e \frac{\nu}{1-2\nu}$$

$$\sigma_i = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_i + \nu \varepsilon_j)$$

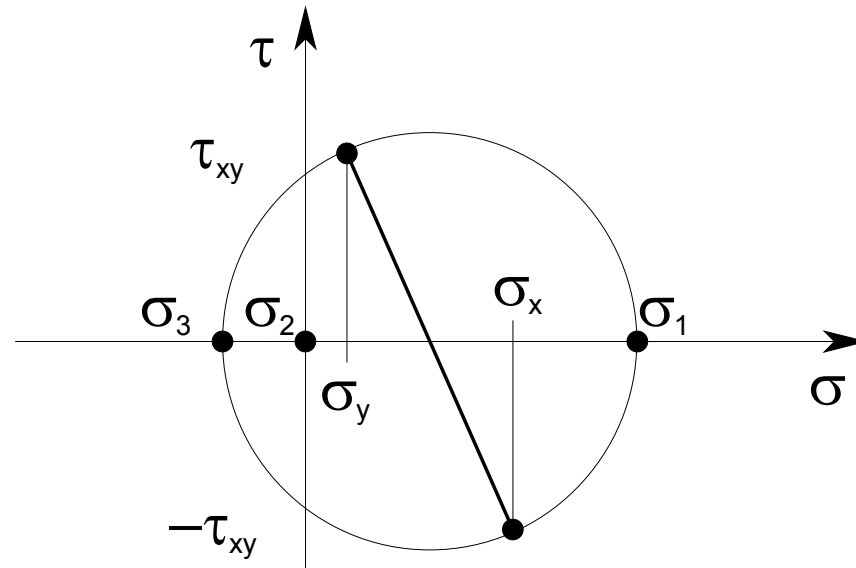
$$i, j = X, Y \quad \text{ou} \quad i, j = 1, 2$$

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.2 – ESTADO PLANO DE TENSÕES

Círculo de Mohr



CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.2 – ESTADO PLANO DE TENSÕES

Casos de tensões proporcionais

$$\sigma_Y = \alpha_\sigma \sigma_X$$

$$\varepsilon_X = \frac{\sigma_X}{E} [1 - \alpha_\sigma \nu]$$

$$\varepsilon_Y = \frac{1}{E} [\alpha_\sigma \sigma_X - \nu \sigma_X] = \frac{\sigma_X}{E} [\alpha_\sigma - \nu]$$

$$\sigma_X = E \varepsilon_X \frac{1}{1 - \alpha_\sigma \nu}$$

Exemplo, para Poisson de 1/3:

α_σ	ESTADO	σ_X
0	UNIAXIAL	$1,00 \cdot E \varepsilon_X$
1/2	CILÍNDRICO	$1,20 \cdot E \varepsilon_X$
1	ESFÉRICO	$1,50 \cdot E \varepsilon_X$
-1	ANTI-ESFÉRICO	$0,75 \cdot E \varepsilon_X$

O caso anti-esférico inclui os casos de cisalhamento e torção.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

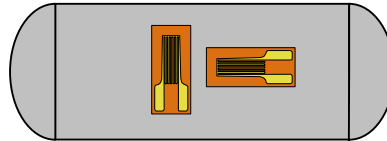
4.2 – ESTADO PLANO DE TENSÕES

$$\alpha_{\sigma} = 0$$



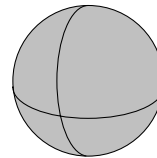
$$\sigma_X = 1,00 \cdot E \varepsilon_X$$

$$\alpha_{\sigma} = 1/2$$



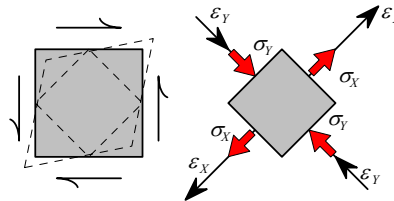
$$\sigma_X = 1,20 \cdot E \varepsilon_X$$

$$\alpha_{\sigma} = 1$$



$$\sigma_X = 1,50 \cdot E \varepsilon_X$$

$$\alpha_{\sigma} = -1$$



$$\sigma_X = 0,75 \cdot E \varepsilon_X$$

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.2 – ESTADO PLANO DE TENSÕES

Casos de deformações proporcionais

$$\varepsilon_Y = \alpha_\varepsilon \varepsilon_X$$

$$\sigma_X = \frac{E}{1-\nu^2} [\varepsilon_X + \nu \varepsilon_Y]$$

$$\sigma_X = E \varepsilon_X \frac{1 + \alpha_\varepsilon \nu}{1 - \nu^2}$$

Exemplo, para Poisson de 1/3:

α_ε	ESTADO	σ_X
$-\nu$	UNIAXIAL	$1,00 \cdot E \varepsilon_X$
1	ESFÉRICO	$1,50 \cdot E \varepsilon_X$
-1	ANTI-ESFÉRICO	$0,75 \cdot E \varepsilon_X$

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.2 – ESTADO QUASE PLANO DE DEFORMAÇÕES

O EQPD é uma situação mais realista do que o EPD, pois não exige uma deformação absolutamente nula numa dada direção.

O EQPD é o que ocorre com estruturas de grande espessura.

O EQPD é definido como o caso no qual a deformação transversal ϵ_z é constante, consequência da grande espessura, mas não zero como exige o EPD.

A aplicação para problemas típicos de análise experimental de tensões, com regiões com elevação de tensão, o EQPD nestas regiões de concentração de tensão pode ser escrito como:

$$\sigma_z = \nu \sigma_x \left[1 - \frac{1}{K_t} \right], \text{ ou no caso geral, } \sigma_z = \nu (\sigma_x + \sigma_y) \left[1 - \frac{1}{K_t} \right]$$

sendo K_t o fator de concentração de tensão para o ponto considerado. A tensão máxima no ponto em questão ocorre na direção X. Considera-se que a tensão em Y seja nula.

O EQPD interpola entre os dois casos limites, EPT, para $K_t = 1$ e EPD para $K_t \rightarrow \infty$, caso de problemas de fratura, na presença de trincas dentro do material. Assim a equação de σ_z reproduz as expressões dos dois casos extremos:

$$\sigma_z = 0, \quad \text{ou} \quad \sigma_z = \nu (\sigma_x + \sigma_y)$$

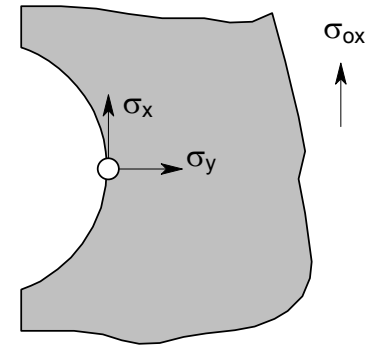
CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.3 – EFEITO DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO

Definição elástica

$$\sigma_{MAX} = \sigma_0 K_t$$



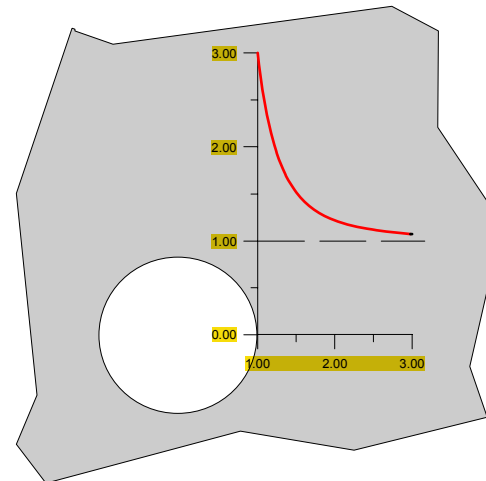
Campo de tensões na proximidade do furo

Exatamente na borda do furo
atuam as tensões

$$\sigma_x = \sigma_{MAX} = \sigma_0 K_t \quad ; \quad \sigma_y = 0$$

A distribuição ao longo do eixo
Y, horizontal

$$\sigma_x = \sigma_0 \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\rho}{Y} \right)^2 + \frac{3}{2} \left(\frac{\rho}{Y} \right)^4 \right]$$



Para $Y = \rho$; $\sigma_x = \sigma_0 \cdot 3$, valor tradicional para o problema de placa sob tração com furo circular.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

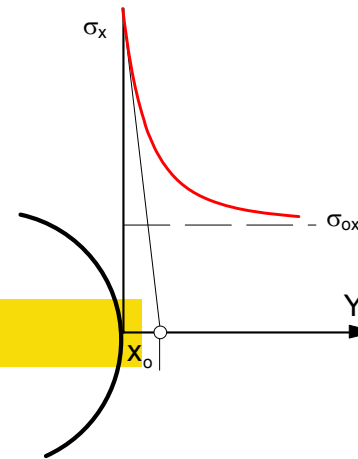
4.3 – EFEITO DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO

Gradiente de tensões na direção radial, eixo Y,

$$G = \frac{1}{\sigma_{MAX}} \frac{\partial \sigma_x}{\partial Y};$$

$$G = \frac{C}{\rho} = \frac{1}{X_0};$$

$$X_0 = \frac{\rho}{C} \approx \frac{\rho}{3}$$



Para o caso de furos de forma elíptica, circular incluso,

$$C = 2 + \frac{1}{K_t}, \text{ logo } C \text{ varia entre } 2 \text{ e } 3.$$

Na direção circunferencial, na parede do furo, a tensão varia como:

$$\sigma_\varphi = \sigma_0 (1 + 2 \cos 2\varphi)$$

φ	0°	60°	90°
σ_φ	$3\sigma_0$	0	$-\sigma_0$

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.3 – EFEITO DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO

Definição do tamanho do SG em regiões com gradiente de tensões.

Com a aproximação linear dada por G , a distância X_0 permite estabelecer a largura do SG, quando aplicado ao lado do ponto de concentração de tensão. Como a relação é linear, a $0,2X_0$ do ponto de máximo a tensão vale 80% da máxima. Como o SG faz uma média, nestas condições ele estará medindo 90% do valor de pico. Assim uma recomendação quanto à largura passa a ser:

$$b_{MAX} \approx \frac{\rho}{10} \quad \text{a} \quad b_{MAX} \approx \frac{\rho}{15}$$



Exemplificando, para uma região na qual o raio que leva ao efeito de concentração de tensão é de 10mm, um extensômetro instalado na face plana, junto à borda do orifício, deve ter uma largura da grade de no máximo 1 mm.

O critério de escolha do SG é a restrição de largura.

CURSO EXTENSOMETRIA

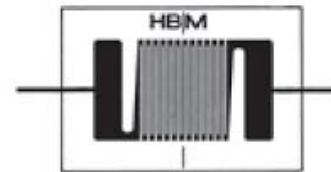
AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.3 – EFEITO DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO

Definição do tamanho do SG em regiões com gradiente de tensões.

Se o SG é montado por dentro do furo, a distribuição no sentido circunferencial passa a ser relevante. Novamente tratando como 80% do valor máximo de tensão o limite da região de aplicação, tal ocorre para um ângulo de $\pm 22,8^\circ$. Isto leva a uma relação:

$$l_{MAX} \approx 0,80 \cdot \rho$$



Exemplificando, para uma região na qual o raio que leva ao efeito de concentração de tensão é de 10mm, um extensômetro instalado internamente ao furo, o comprimento máximo, independente da largura, será de 8 mm.

O critério de escolha do SG é a restrição de comprimento.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.3 – EFEITO DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO

Solução no campo plástico

Dentro do regime plástico o problema de concentração de tensão passa a ter um tratamento mais complexo, pois tensão e a deformação não são mais proporcionais. Uma solução analítica amplamente usada é a regra de Neuber generalizada:

$$\left(\frac{K_{\sigma}}{K_t}\right)^n \left(\frac{K_{\varepsilon}}{K_t}\right) = 1$$

K_{σ} Fator de concentração de tensão

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma_{máx}}{\sigma_o} \leq K_t$$

K_{ε} Fator de concentração de deformação

$$K_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{máx}}{\varepsilon_o} \geq K_t$$

n	Caso considerado
0,0	Estado plano de deformação
0,5	Problemas axissimétricos
1,0	Estado plano de tensão

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

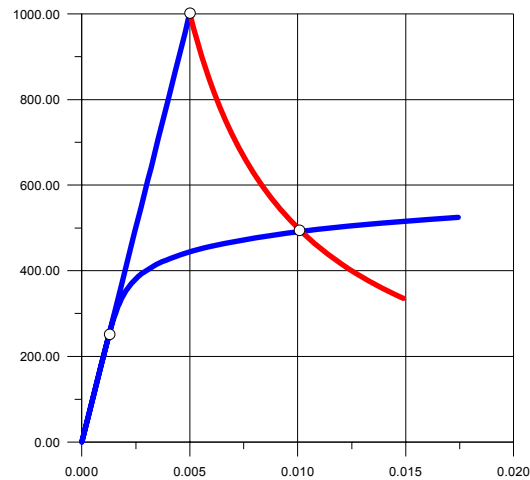
4.3 – EFEITO DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO

Exemplo:

$$\sigma_o = 250 \text{ MPa} \quad ; \quad K_t = 4$$

$$E = 2 \cdot 10^5 \quad ; \quad \varepsilon_o = 0,00125$$

$$\sigma = k \cdot \varepsilon_p^n \quad ; \quad n = 0,10 \quad ; \quad k = 800 \text{ MPa}$$



Solução:

$$\sigma_{0,2} = 430 \text{ MPa} \quad ; \quad \sigma_o \cdot K_t = 1000 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{máx} = 500 \text{ MPa} \quad ; \quad \varepsilon_{máx} = 0,010$$

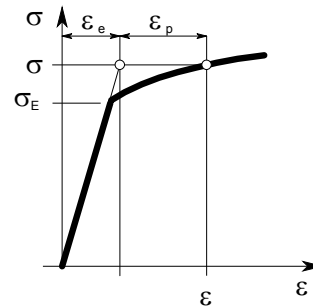
Conhecendo-se $\varepsilon_{máx}$ é possível selecionar o extensômetro e o adesivo mais adequados à aplicação.

CURSO EXTENSOMETRIA

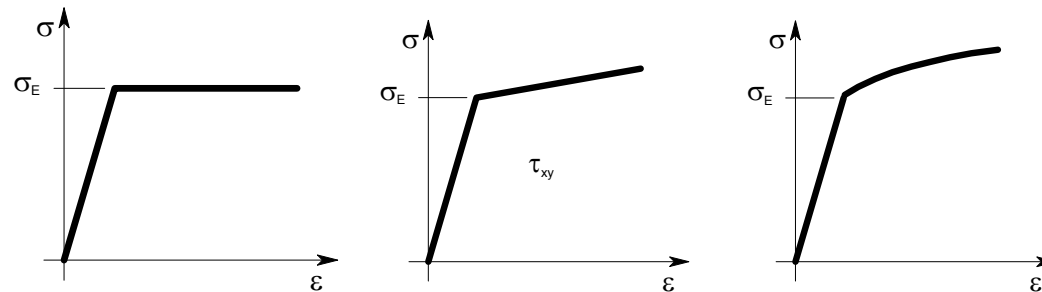
AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.4 – EFEITO DE DEFORMAÇÕES PLÁSTICAS

Definição de deformação plástica



Modelos de curvas tensão-deformação



Modelos de tensão residual

$$\sigma_r \approx \sigma_E - \sigma_{elástico} ; \quad \sigma_{elástico} \leq 2\sigma_E$$

$$\sigma_r = \sigma_0(K_\sigma - K_t); \quad K_\sigma \leq K_t$$

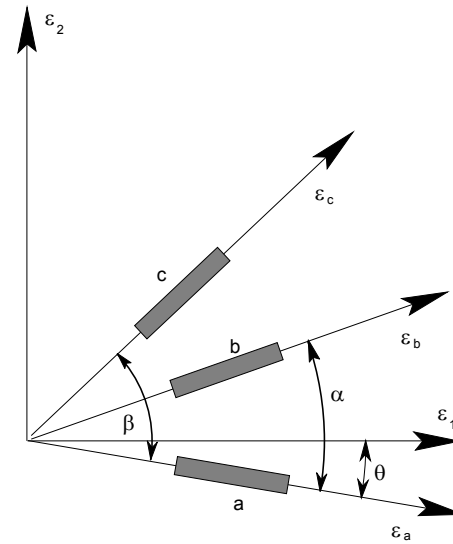
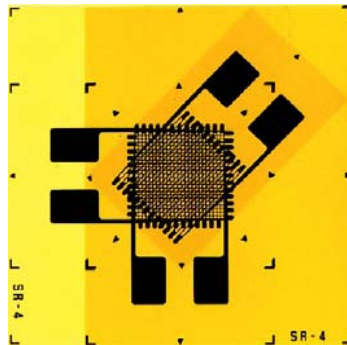
$$\varepsilon_r = \varepsilon_0(K_\varepsilon - K_t); \quad K_\varepsilon \geq K_t$$

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.5 – DEFORMAÇÕES EM DIREÇÕES ARBITRÁRIAS

Formulação geral



$$\varepsilon_a = \frac{1}{2}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + \frac{1}{2}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cos 2\theta$$

$$\varepsilon_b = \frac{1}{2}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + \frac{1}{2}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cos 2(\alpha - \theta)$$

$$\varepsilon_c = \frac{1}{2}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + \frac{1}{2}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cos 2(\beta - \theta)$$

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.5 – DEFORMAÇÕES EM DIREÇÕES ARBITRÁRIAS

Direção de deformação zero, estado biaxial de tensões
Para o caso biaxial de tensões, a direção de deformação zero, em relação à direção 1, com $\theta = 0$, é definida por:

$$\cos 2\beta_0 = -\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} = -\frac{1 + \alpha_\sigma(1 - \nu) - \nu}{1 - \alpha_\sigma(1 + \nu) + \nu}$$

Direção de deformação zero, estado uniaxial de tensões, $\alpha_\sigma = 0$
No caso de um estado uniaxial de tensões é gerado um estado biaxial de deformações, e o ângulo para direção de deformação zero será obtido como:

$$\varepsilon_y = -\nu \varepsilon_x$$

$$\cos 2\beta_0 = -\frac{1 - \nu}{1 + \nu}$$

Para este caso a direção de deformação zero é:

ν	0,20	0,25	0,30	0,3333	0,35	0,40	0,50
β_0	65,90°	63,43°	61,29°	60,00°	59,39°	57,70°	54,74°

Resumindo, a indicação é $60^\circ \pm 3^\circ$.

Para uma orientação qualquer,

$$\varepsilon_\beta = \varepsilon_1 \frac{1}{2} [(1 - \nu) + (1 + \nu) \cos 2\beta]$$

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.5 – DEFORMAÇÕES EM DIREÇÕES ARBITRÁRIAS

Para uma orientação qualquer,

$$\varepsilon_{\beta} = \varepsilon_1 \frac{1}{2} [(1 - \nu) + (1 + \nu) \cos 2\beta]$$

Para alguns valores particulares do ângulo:

β	$\varepsilon_{\beta} / \varepsilon_1$
0°	1
30°	$(1 - 3\nu) / 4$
45°	$(1 - \nu) / 2$
60°	$(3 - \nu) / 4$
90°	$-\nu$

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.6 - ESTUDO DE CASOS

TRAÇÃO

Configuração da ponte e posicionamento dos extensômetros:

- 1/4 de ponte;
- 1/4 de ponte, insensível à flexão em um plano;
- 1/4 de ponte, insensível à flexão em dois planos;
- 1/2 ponte com compensação de temperatura;
- 1/2 ponte, Poisson;
- 1/2 ponte diagonal, não cancela flexão;
- 1/2 ponte, cancela flexão;
- 1/2 ponte, com 4 extensômetros;
- 4/4 ponte completa, Poisson;
- 4/4 ponte completa, dois dummy.

FLEXÃO

Configuração da ponte e posicionamento dos extensômetros:

- 1/2 ponte, cancela carga axial;
- 1/2 ponte, com 4 extensômetros;
- 1/2 ponte, determinar o gradiente de deformação;
- 4/4 ponte completa, cancela carga axial.

CURSO EXTENSOMETRIA

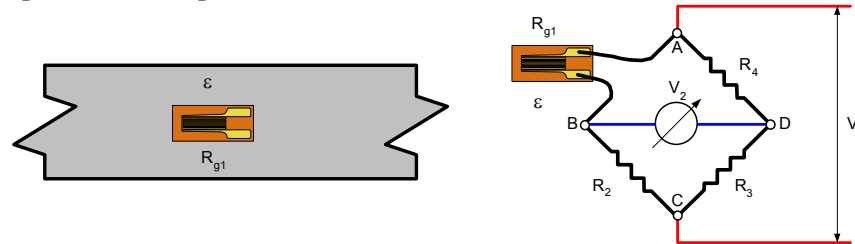
AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.6 – ESTUDO DE CASOS

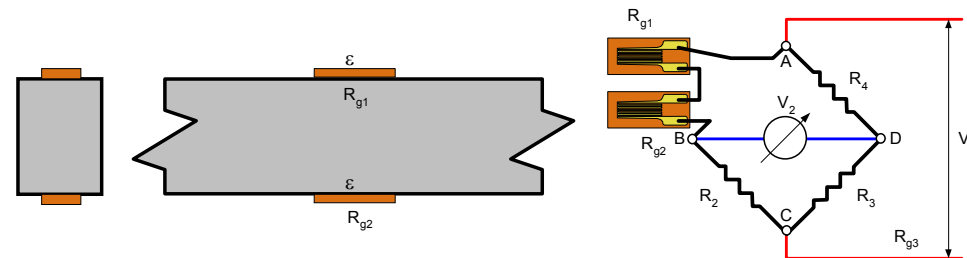
Tração, 1/4 de ponte.

Configuração da ponte e posicionamento dos extensômetros:

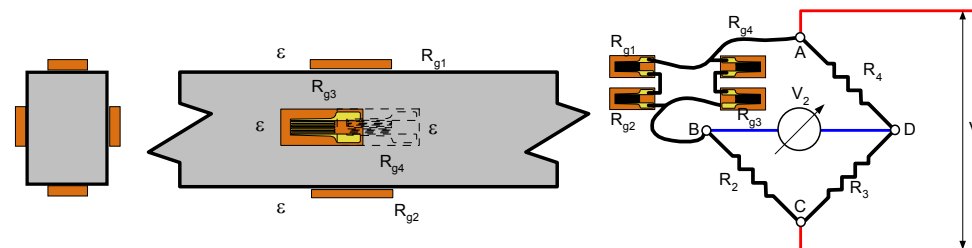
1/4 de ponte, simples.



1/4 de ponte, insensível à flexão em um plano.



1/4 de ponte, insensível à flexão em dois planos.



CURSO EXTENSOMETRIA

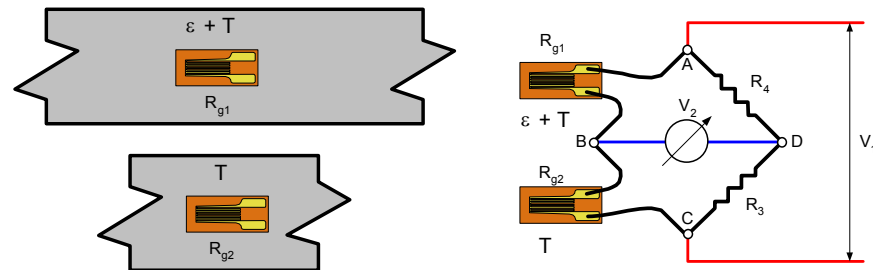
AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.6 – ESTUDO DE CASOS

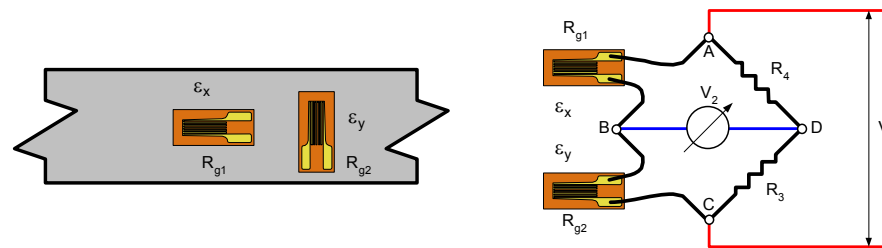
Tração, 1/2 ponte.

Configuração da ponte e posicionamento dos extensômetros:

1/2 ponte com compensação de temperatura.



1/2 ponte, Poisson.



CURSO EXTENSOMETRIA

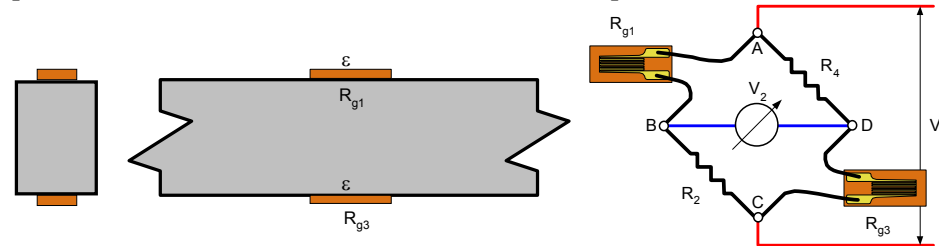
AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.6 – ESTUDO DE CASOS

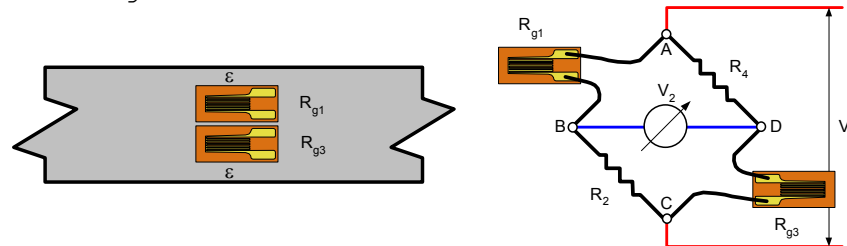
Tração, 1/2 ponte.

Configuração da ponte e posicionamento dos extensômetros:

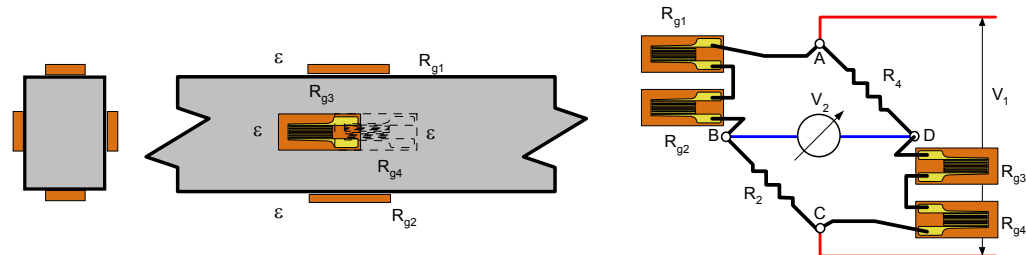
1/2 ponte, insensível à flexão, em um plano.



1/2 ponte diagonal.



1/2 ponte diagonal com 4 SGs, cancela a flexão em dois planos.



CURSO EXTENSOMETRIA

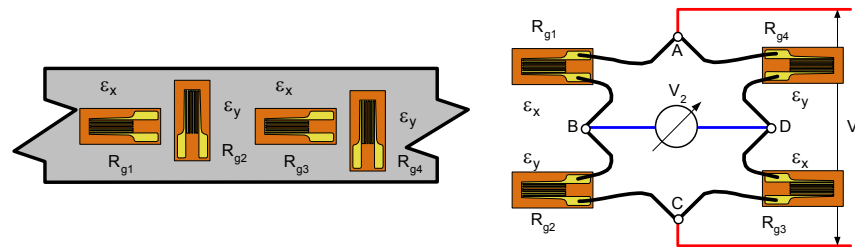
AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.6 – ESTUDO DE CASOS

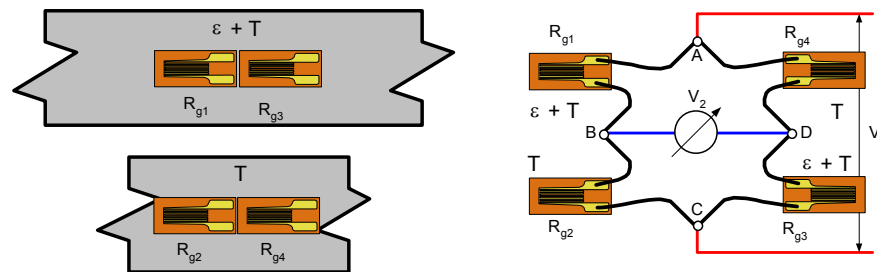
Tração, ponte completa.

Configuração da ponte e posicionamento dos extensômetros:

Ponte completa, Poisson;



Ponte completa, dois dummy.



CURSO EXTENSOMETRIA

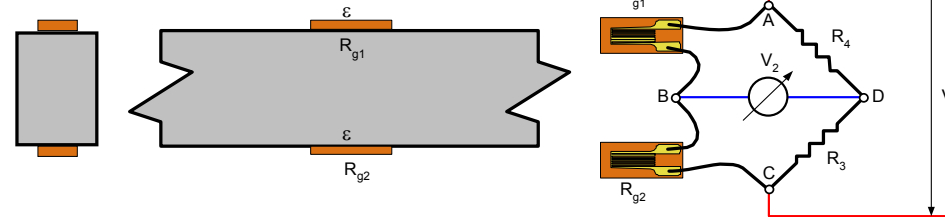
AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.6 – ESTUDO DE CASOS

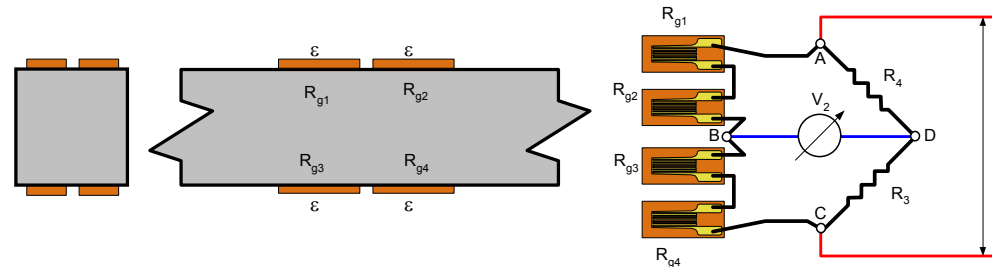
Flexão, 1/2 ponte.

Configuração da ponte e posicionamento dos extensômetros:

1/2 ponte, cancela carga axial;

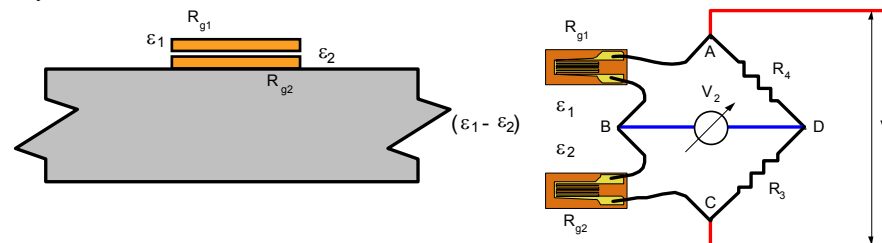


1/2 ponte com 4 extensômetros.



1/2 ponte, determinar o gradiente de deformação;

$$\frac{d\epsilon}{dy} = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{d} ; \quad d - \text{distância entre os extensômetros.}$$



CURSO EXTENSOMETRIA

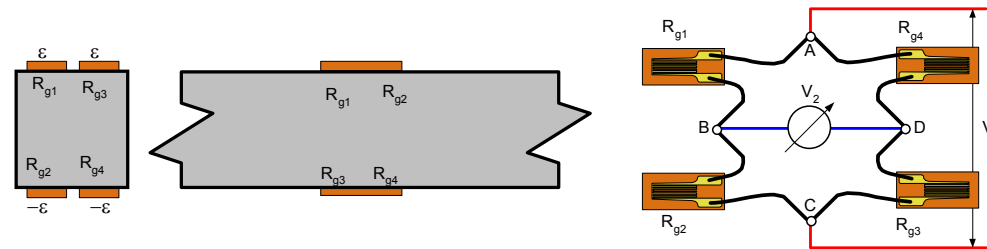
AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.6 – ESTUDO DE CASOS

Flexão, ponte completa.

Configuração da ponte e posicionamento dos extensômetros:

Ponte completa, cancela carga axial.



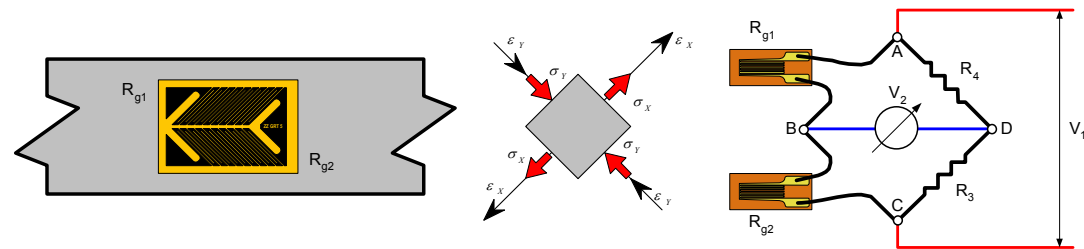
CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.6 – ESTUDO DE CASOS

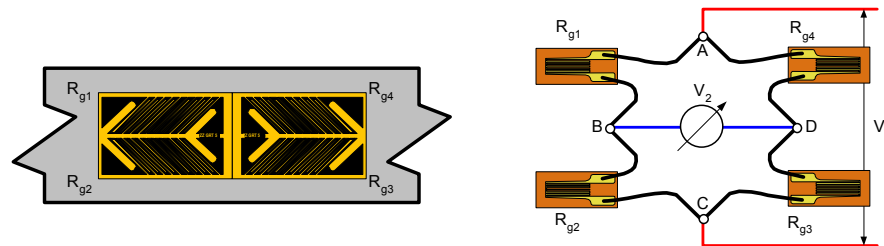
Torção e cisalhamento.

Configuração da ponte e posicionamento dos extensômetros.



Torção e cisalhamento.

Configuração da ponte e posicionamento dos extensômetros.



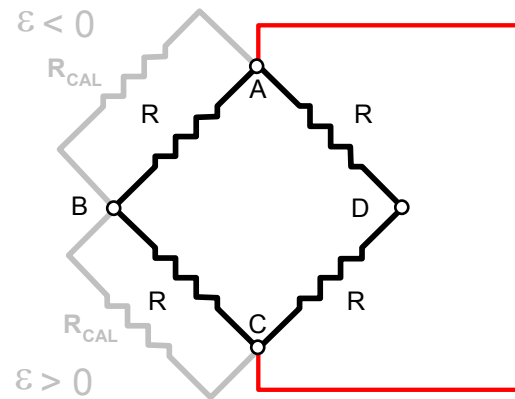
CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.7 – CALIBRAÇÃO DOS SG NA ANÁLISE DE TENSÕES

Calibração shunt

Na análise experimental de tensões não se tem uma grandeza física que possa ser utilizada para calibrar a leitura da ponte. Neste caso a solução é simular uma deformação aparente pela associação em paralelo com os SGs da ponte de um resistor de precisão, que desequilibra a ponte, simulando uma deformação no extensômetro.



$$R = \frac{R_g R_{CAL}}{R_g + R_{CAL}}; \quad \Delta R = R - R_g$$

$$\frac{\Delta R}{R_g} = \frac{R_{CAL}}{R_g + R_{CAL}} - 1 = - \frac{R_g}{R_g + R_{CAL}}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \bar{\varepsilon} = - \frac{R_g}{R_g + R_{CAL}}; \quad \bar{\varepsilon} = - \frac{1}{k} \frac{1}{1 + R_{CAL}/R_g},$$

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.7 – CALIBRAÇÃO DOS SG NA ANÁLISE DE TENSÕES

Calibração shunt

$$\bar{\varepsilon} = -\frac{1}{k} \frac{1}{1 + R_{CAL}/R_g}, \text{ deformação aparente}$$

A deformação aparente que está sendo simulada é compressiva quando R_{CAL} está no braço 1 da ponte e trativa quando R_{CAL} está no braço 2 da ponte.

O procedimento a ser adotado é de uma vez verificada a ponte quanto às conexões e a adequada aplicação dos extensômetros, é de primeiro zerar a ponte, esperando a mesma estabilizar, e após fazer a calibração shunt, braço 1 e braço 2.

Exemplo: Calibração no braço 1 da ponte.

$$R_{CAL} = -R_g \left[\frac{1}{k\bar{\varepsilon}} + 1 \right]; \quad k = 2; \quad \bar{\varepsilon} = -10^{-3}; \quad R_{CAL} = 499 \cdot R_g$$

$$R_g = 120 \, \Omega; \quad R_{CAL} = 59\,880 \, \Omega \qquad R_g = 350 \, \Omega; \quad R_{CAL} = 174\,650 \, \Omega$$

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.8 – ANÁLISE DE ROSETAS

Quando se trabalha com transdutores é comum usar a Ponte de Wheatstone com um extensômetro XY formando dois braços contíguos da ponte, aproveitando o efeito de Poisson para aumentar a sensibilidade.

Em problemas de análise experimental de tensões isto nunca deve ser feito, pois o objetivo aqui é determinar o estado de tensões no ponto. Assim, cada extensômetro da roseta deve ser tratado individualmente, formando diferentes pontes de Wheatstone, em quarto de ponte, sempre a três fios.

Isto é necessário para determinar separadamente as deformações em cada uma das direções, de forma a poder identificar o estado de tensões.

Uma exceção pode ser aberta para o caso de cisalhamento puro ou torção, com o uso de rosetas espinha de peixe, a 45° , usando os dois extensômetros para formar meia ponte.

A análise de rosetas está normalizada pela especificação E 1561 da ASTM.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.8 – ANÁLISE DE ROSETAS

Roseta 0-90

Usada quando as direções principais são bem estabelecidas.
São determinadas diretamente as deformações principais.

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_1 + \nu \varepsilon_2)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_2 + \nu \varepsilon_1)$$

Roseta ± 45

Tipicamente usada para medidas envolvendo tensões tangenciais,
como cisalhamento em vigas, ou esforços de torção.

As deformações medidas valem a metade da deformação de
cisalhamento, convencionalmente definida.

$$\gamma_{XY} = 2\varepsilon_{XY}$$

$$\varepsilon_{XY} = \varepsilon_1 = -\varepsilon_2$$

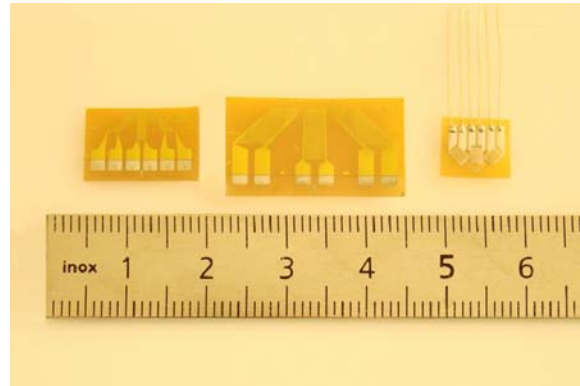
$$\tau_{XY} = \gamma_{XY} \cdot G$$

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.8 – ANÁLISE DE ROSETAS

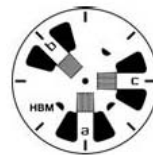
Roseta 0-45-90



$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{2}(\varepsilon_a + \varepsilon_c) \pm \sqrt{\frac{1}{2}[(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2]}$$

$$\tan 2\theta = \frac{2\varepsilon_b - (\varepsilon_a + \varepsilon_c)}{\varepsilon_a - \varepsilon_c}$$

$$\sigma_{1/2} = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} \pm \frac{E}{\sqrt{2}(1+\nu)} \cdot \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2}$$



0°/45°/90° rosette,
e.g. RY3x

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.8 – ANÁLISE DE ROSETAS

Roseta 0-60-120

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{3}(\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c) \pm \frac{1}{3}\sqrt{2[(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_a)^2]}$$

$$\tan 2\theta = \frac{\sqrt{3}(\varepsilon_b - \varepsilon_c)}{2\varepsilon_a - (\varepsilon_b + \varepsilon_c)}$$

$$\sigma_{1/2} = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c}{3} \pm \frac{E}{1+\nu} \cdot \sqrt{\left(\frac{2\varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c}{3}\right)^2 + \frac{1}{3}(\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2}$$



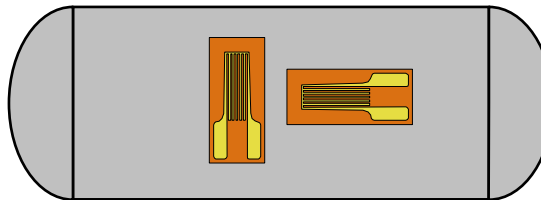
0°/60°/120° rosette,
e.g. RY7x

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.8 – ANÁLISE DE ROSETAS

Exemplo



CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.8 – ANÁLISE DE ROSETAS

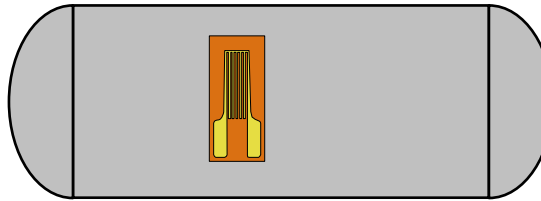
Exemplo

Em um reservatório foi medida uma deformação circunferencial de $3,6 \cdot 10^{-4}$.

Se fosse um estado uniaxial a tensão seria calcula com o valor de 75 MPa. Porém o ensaio foi realizado em um reservatório com 600 mm de diâmetro, 4 mm de parede e uma pressão interna de 12 atm, aproximadamente 1,2 MPa. Calculando a tensão para o caso de reservatórios cilíndricos de parede fina, na direção circunferencial,

$$\sigma_{\theta} = \frac{p D}{2 e} = 90 \text{ MPa}$$

Fica evidente que o estado biaxial do estado de tensões cilíndrico afeta o resultado. Com o coeficiente de Poisson igual a $1/3$, resulta $\sigma_x = 1,20 \cdot E \varepsilon_x$, logo $\sigma_x = 90 \text{ MPa}$, conforme calculado.

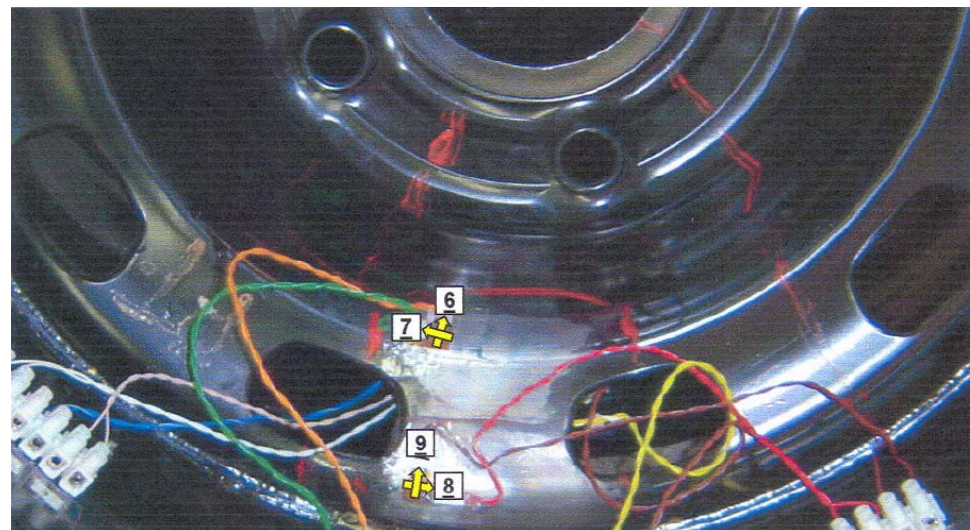
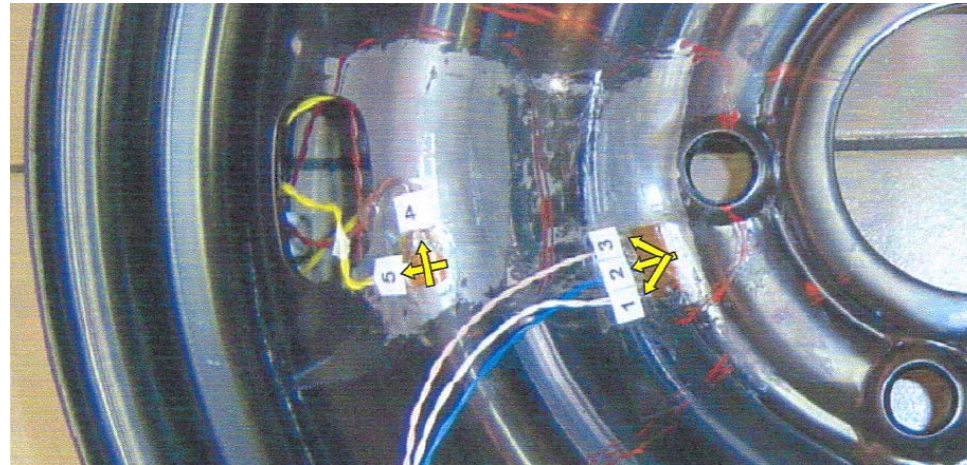


CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.8 – ANÁLISE DE ROSETAS

Exemplo

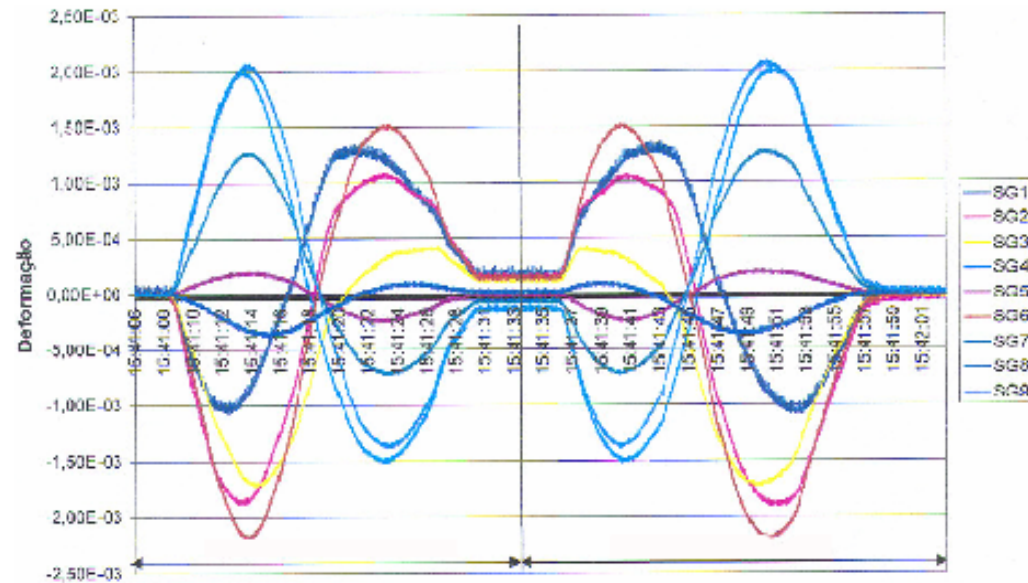


CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.8 – ANÁLISE DE ROSETAS

Exemplo



SENSOR	DEFORMAÇÃO (ϵ)			
	$\epsilon_{min.}$	$\epsilon_{max.}$	$\Delta\epsilon$	ϵ_a
SG1	-1,1E-3	1,4E-3	2,5E-3	1,2E-3
SG2	-1,9E-3	1,1E-3	3,0E-3	1,5E-3
SG3	-1,7E-3	430,6E-6	2,2E-3	1,1E-3
SG4	-1,5E-3	2,0E-3	3,5E-3	1,8E-3
SG5	-259,1E-6	213,4E-6	472,4E-6	236,2E-6
SG6	-2,2E-3	1,5E-3	3,7E-3	1,9E-3
SG7	-733,3E-6	1,3E-3	2,0E-3	1,0E-3
SG8	-373,4E-6	112,0E-6	485,4E-6	242,7E-6
SG9	-1,4E-3	2,1E-3	3,5E-3	1,7E-3

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.8 – ANÁLISE DE ROSETAS

Exemplo

Considerando $E=210 \text{ GPa}$,

SENSOR	DEFORMAÇÃO (ε)				TENSÃO (N/m^2)			
	$\varepsilon_{\min.}$	$\varepsilon_{\max.}$	$\Delta\varepsilon$	ε_a	$\sigma_{\min.}$	$\sigma_{\max.}$	$\Delta\sigma$	σ_a
SG1	-1,1E-3	1,4E-3	2,5E-3	1,2E-3	-229,7E+6	285,1E+6	514,7E+6	257,4E+6
SG2	-1,9E-3	1,1E-3	3,0E-3	1,5E-3	-400,6E+6	227,0E+6	627,6E+6	313,8E+6
SG3	-1,7E-3	430,6E-6	2,2E-3	1,1E-3	-363,4E+6	90,4E+6	453,8E+6	226,9E+6
SG4	-1,5E-3	2,0E-3	3,5E-3	1,8E-3	-318,5E+6	421,9E+6	740,4E+6	370,2E+6
SG5	-259,1E-6	213,4E-6	472,4E-6	236,2E-6	-54,4E+6	44,8E+6	99,2E+6	49,6E+6
SG6	-2,2E-3	1,5E-3	3,7E-3	1,9E-3	-460,8E+6	319,8E+6	780,5E+6	390,3E+6
SG7	-733,3E-6	1,3E-3	2,0E-3	1,0E-3	-154,0E+6	268,3E+6	422,3E+6	211,1E+6
SG8	-373,4E-6	112,0E-6	485,4E-6	242,7E-6	-78,4E+6	23,5E+6	101,9E+6	51,0E+6
SG9	-1,4E-3	2,1E-3	3,5E-3	1,7E-3	-292,1E+6	434,9E+6	727,0E+6	363,5E+6

Discussão dos Resultados

Os dados obtidos com a medição da deformação apresentam resultados compatíveis como esperado, sem problemas de interferência e boa repetibilidade.

As deformações medidas estão retratando a realidade observada durante os testes de fadiga, mostrando que as regiões onde as trincas ocorrem as deformações são mais elevadas. As deformações obtidas ajudarão a validar os modelos de elementos finitos.

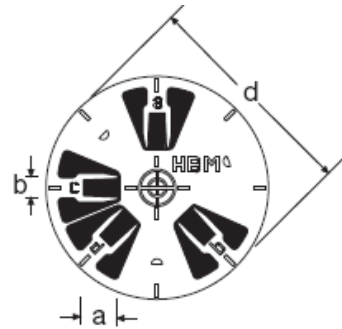
Conclusões?

CURSO EXTENSOMETRIA

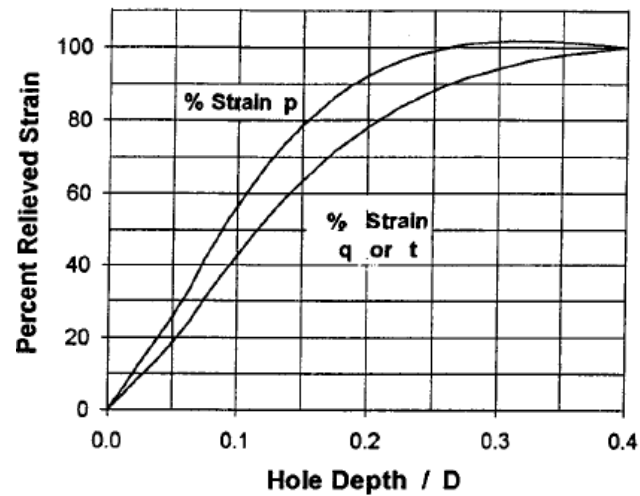
AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.9 -ESTUDO DE TENSÕES RESIDUAIS

Método do furo cego, ASTM E-837



Type A Rosette

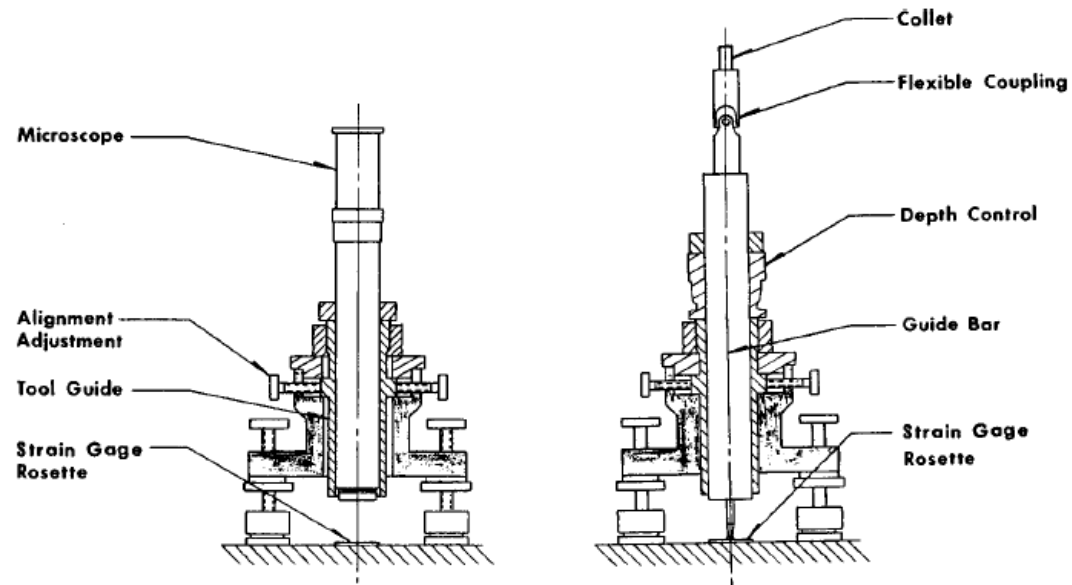


CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.9 -ESTUDO DE TENSÕES RESIDUAIS

Método do furo cego



CURSO EXTENSOMETRIA

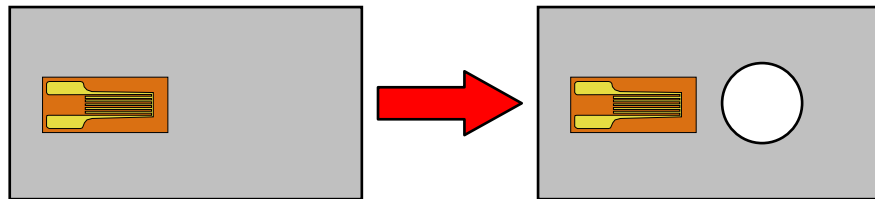
AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.9 -ESTUDO DE TENSÕES RESIDUAIS

Controle de qualidade

Uso de extensômetro mais usual, quando já existe uma larga base de conhecimento dos pontos relevantes quanto à tensão residual, quanto à direção e ao valor admissível de deformação.

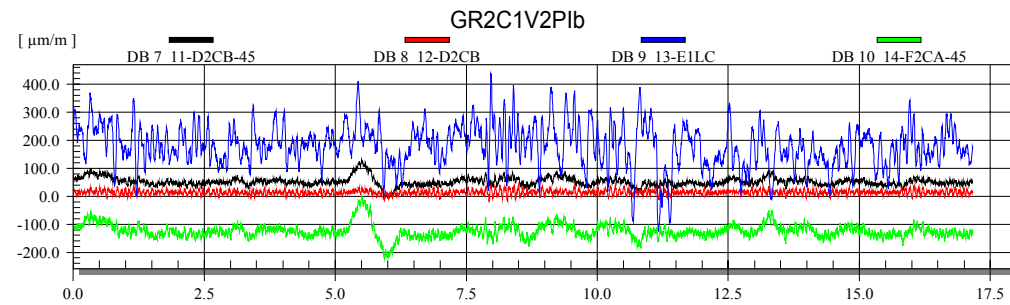
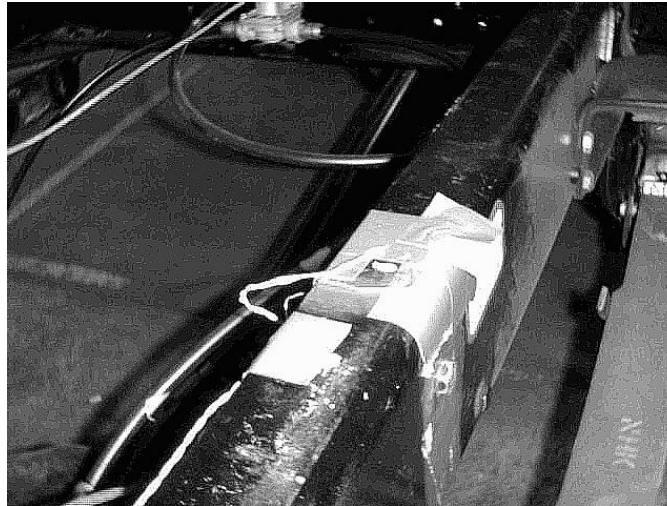
É usado numa base comparativa, dentro de limites definidos previamente.



CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

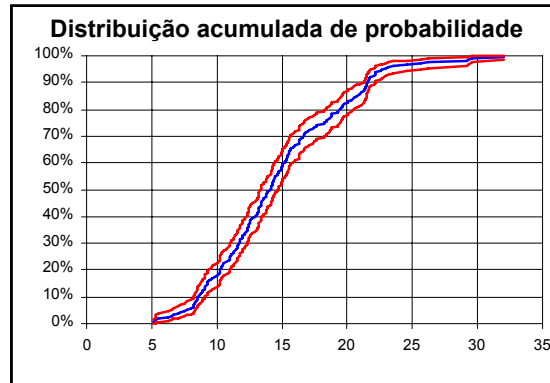
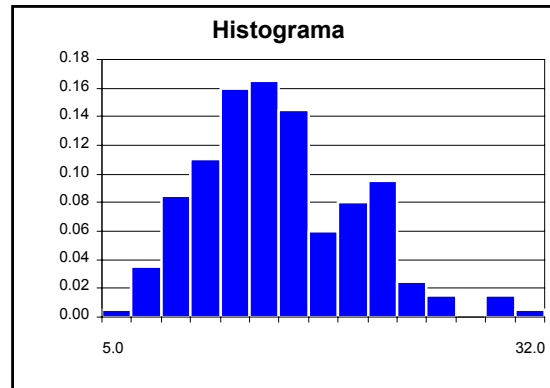
4.10 – EXEMPLO DE APLICAÇÃO



CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 4 - USO DE SG PARA ANÁLISE EXPERIMENTAL DE TENSÕES

4.10 – EXEMPLO DE APLICAÇÃO



CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 5 – INSTRUMENTAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

Instrumentação

- Configuração geral de um SCAD
- Circuitos de zeragem
- Amplificação
- Multiplexação
- Conversão AD
- Padrões de comunicação

Análise de erro

- Fiação a 2, 3, 4 e 6 fios
- Alimentação
- Outros efeitos
- Metodologia de análise de erros

Seleção do SG e da instrumentação

- Escolha do tipo de SG para uma dada aplicação
- Escolha das características da ponte
- Escolha da fiação, tabela AWG

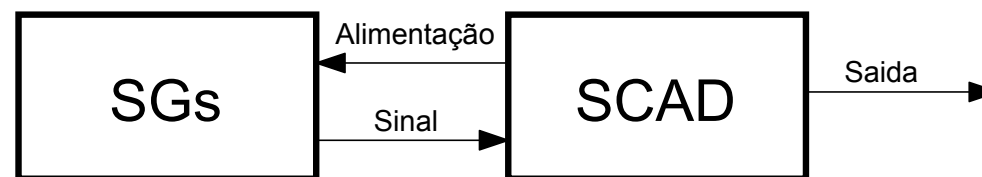
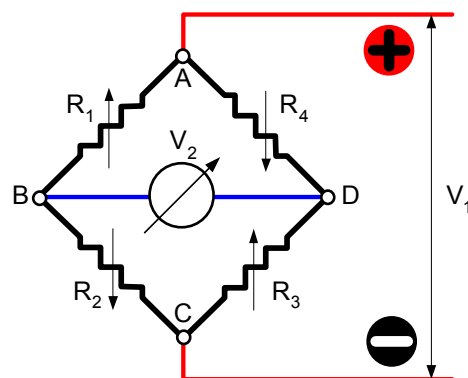
Aplicação de SG

- Escolha do local e orientação do SG
- Preparo do SG para aplicação
- Preparo do local de aplicação
- Preparo da fiação
- Aplicação do SG
- Proteção da aplicação
- Verificação da qualidade da aplicação

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 5 – INSTRUMENTAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

5.1 – INSTRUMENTAÇÃO

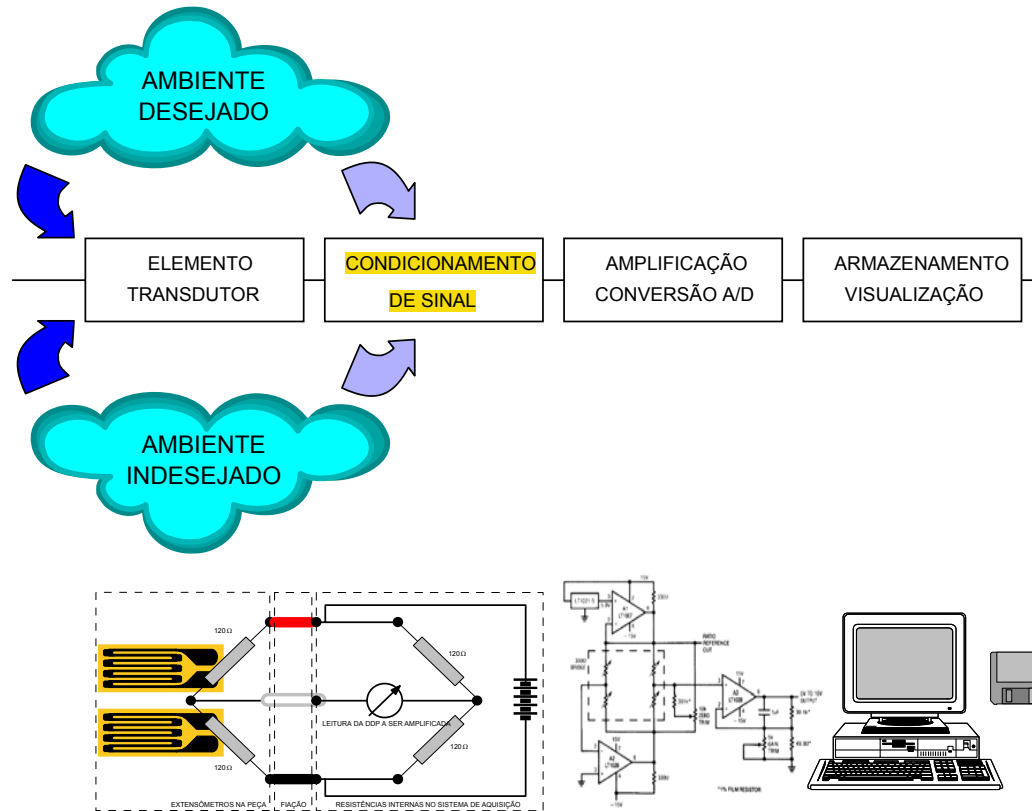


SCAD – Sistema de condicionamento e aquisição de dados

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 5 – INSTRUMENTAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

5.1 – INSTRUMENTAÇÃO

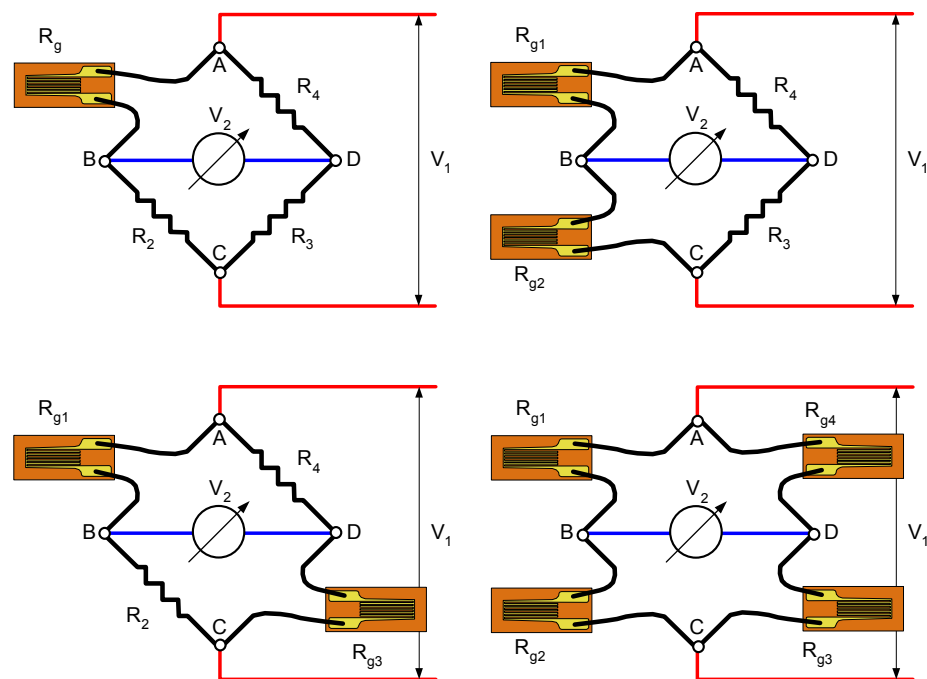


Esquema geral de um sistema de medição em ambientes não ideais.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 5 – INSTRUMENTAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

5.1 – INSTRUMENTAÇÃO



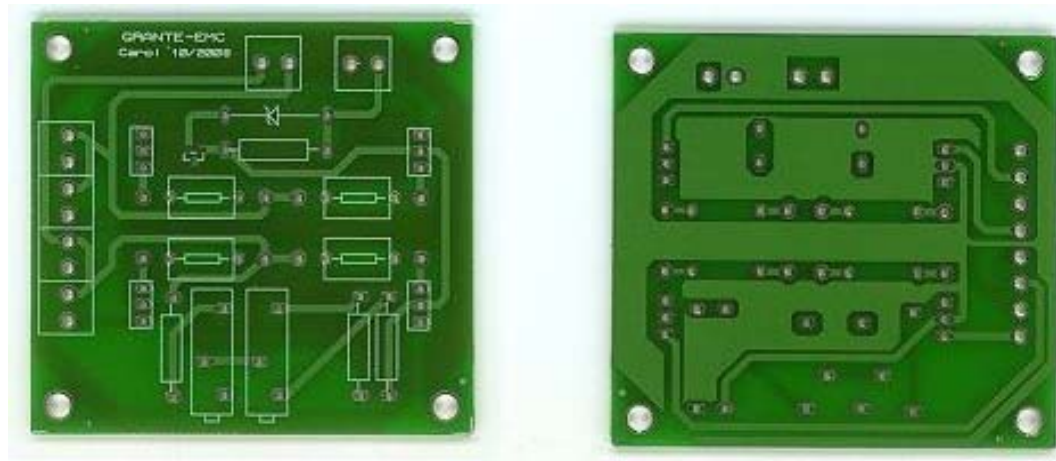
R_g de 120 ou 350 Ω , na grande maioria dos casos.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 5 – INSTRUMENTAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

5.1 – INSTRUMENTAÇÃO

Exemplo de placa de condicionamento, uso didático.



Funcionalidades:

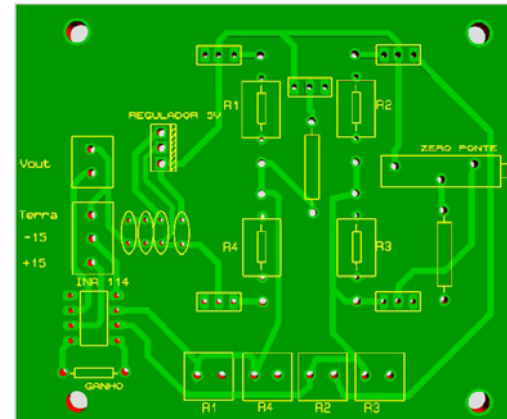
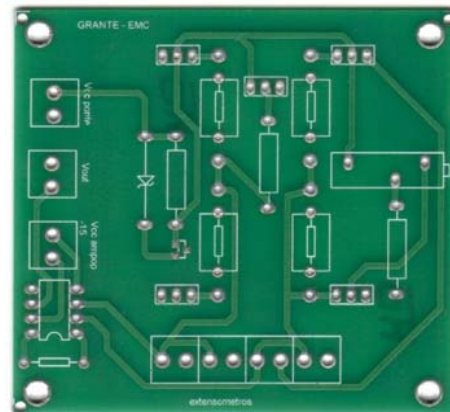
- Complementa a ponte para as configurações 1/4, 1/2, 1/4 + 1/4, completa
- Alimentação de precisão
- Circuito de zeragem

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 5 – INSTRUMENTAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

5.1 – INSTRUMENTAÇÃO

Placa de condicionamento, uso didático, versão 2 e versão 3.



Funcionalidades:

- Complementa a ponte para as configurações

 - $1/4$, $1/2$, $1/4 + 1/4$, completa

- Alimentação de precisão

- Circuito de zeragem

- Circuito de calibração

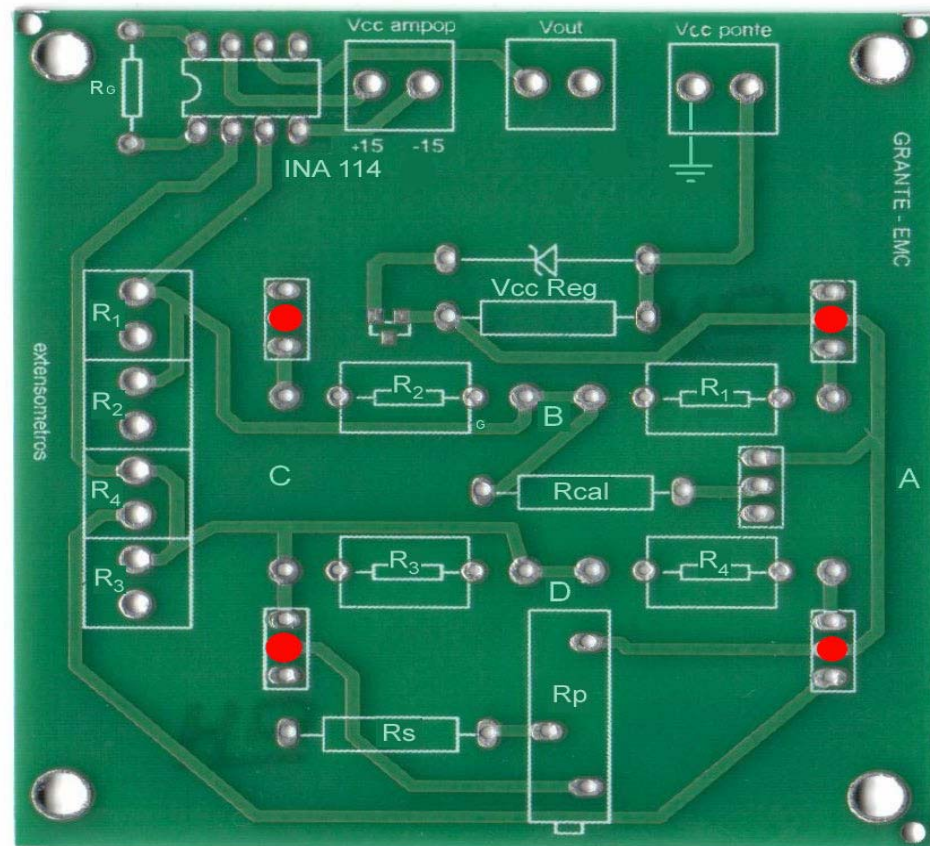
- Amplificador de instrumentação com ganho variável

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 5 - INSTRUMENTAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

5.1 - INSTRUMENTAÇÃO

Placa de condicionamento, uso didático, versão 2.



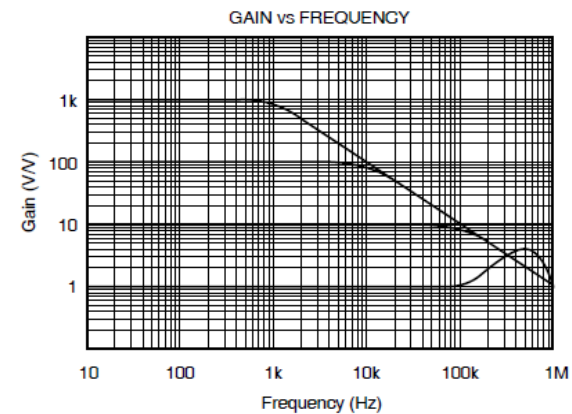
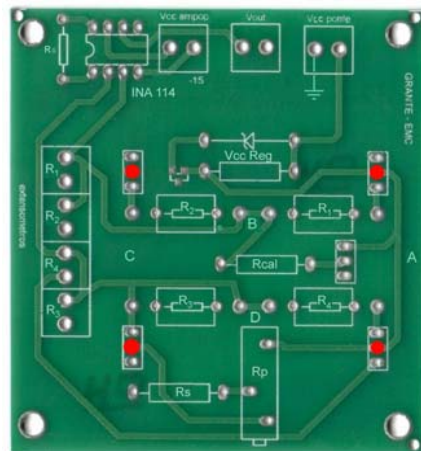
CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 5 - INSTRUMENTAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

5.1 - INSTRUMENTAÇÃO

Exemplo de placa de condicionamento, uso didático, versão 2.

Usa amplificador de instrumentação. INA 114, ganho variável, com alimentação simétrica, $V_{in} (-)$ e $V_{in} (+)$.



- 1 - Gain resistor
- 2 - $V_{in} (-)$
- 3 - $V_{in} (+)$
- 4 - V supply $(-)$
- 5 - V reference (ground)
- 6 - V out $(+)$
- 7 - V supply $(+)$
- 8 - Gain resistor

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 5 - INSTRUMENTAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

5.1 - INSTRUMENTAÇÃO

Exemplo de cálculo do valor do resistor de ganho.

Ponte completa com dois extensômetros duplos, XY, fazendo uso do efeito de Poisson.

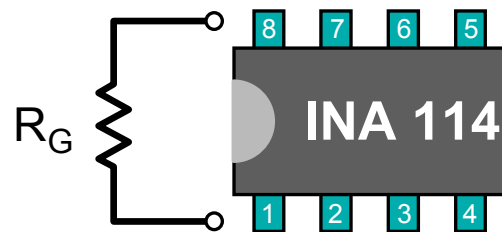
Fundo de escala de deformação axial de 0,001.

Coefficiente de Poisson 0,285.

$$V1/V2 = \frac{1}{4} (1+\nu) \cdot 2 \cdot 0,001 = 0,6425 \text{ mV/V}$$

Para fundo de escala na saída de 10 V, ganho de 15 564.

$$R_G = 50 \text{ k}\Omega / (G - 1) = 3,2127 \text{ }\Omega$$



1 - Gain resistor

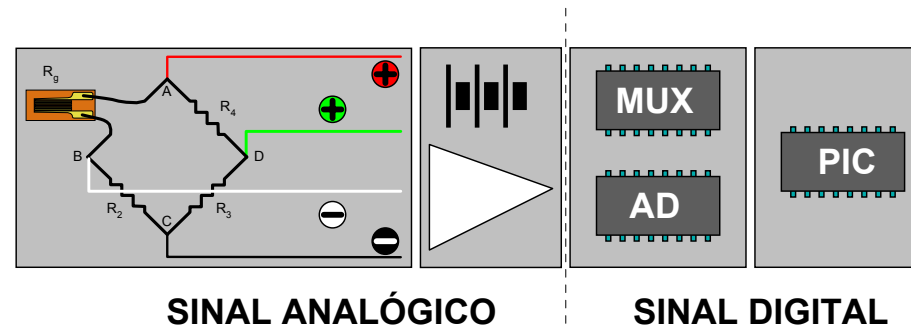
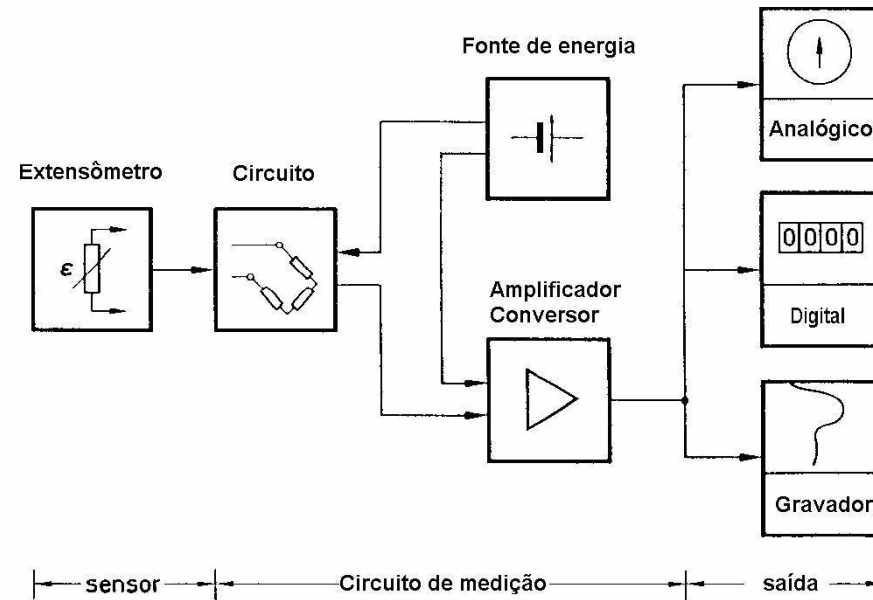
8 - Gain resistor

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 5 - INSTRUMENTAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

5.1 - INSTRUMENTAÇÃO

Configuração geral de um SCAD



CURSO EXTENSOMETRIA

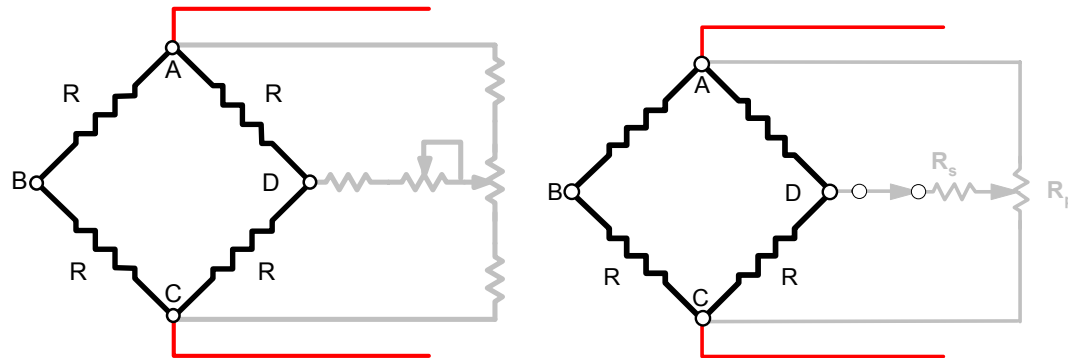
AULA 5 - INSTRUMENTAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

5.1 - INSTRUMENTAÇÃO

Compensação de temperatura

TC	MATERIAL	α VALUE	
01	quartz	0.50	$\cdot 10^{-6}/K$
05	molybdenum	5.40	$\cdot 10^{-6}/K$
09	titanium	9.00	$\cdot 10^{-6}/K$
09	gray cast iron	9.00	$\cdot 10^{-6}/K$
11	ferritic steel	10.8	$\cdot 10^{-6}/K$
15	austenitic steel	16.0	$\cdot 10^{-6}/K$
23	aluminum	23.0	$\cdot 10^{-6}/K$
65	plastic material	65.0	$\cdot 10^{-6}/K$

Circuitos de zeragem

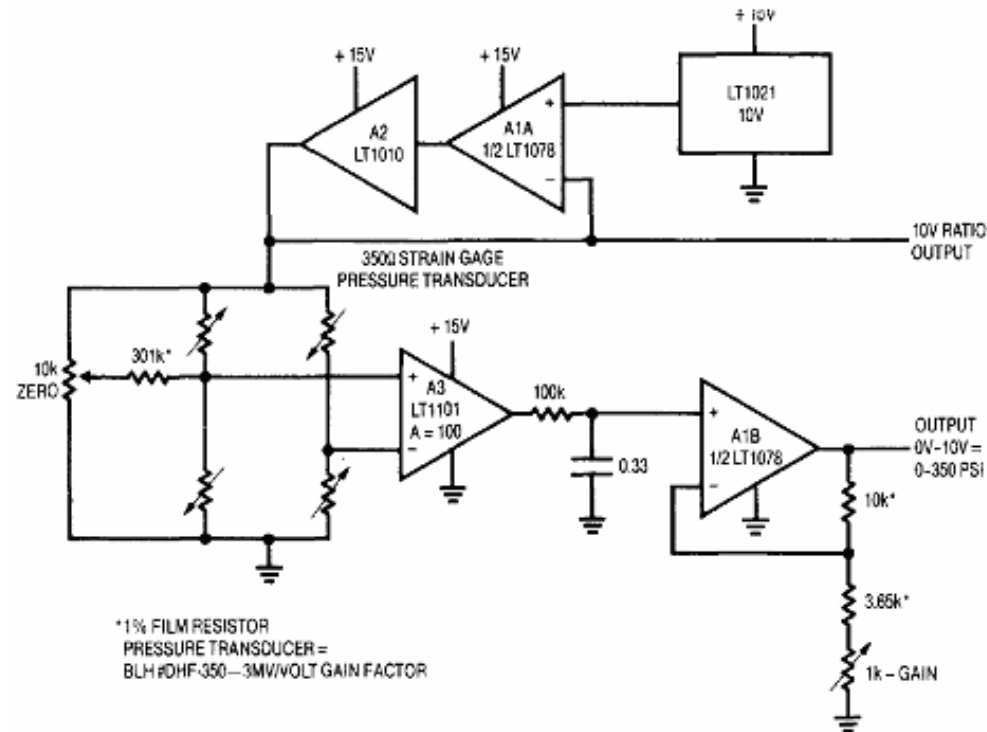


CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 5 - INSTRUMENTAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

5.1 - INSTRUMENTAÇÃO

Amplificação



Circuito com o uso de três amplificadores operacionais para fornecer sinal de saída, modulado entre 0 e 10 V.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 5 – INSTRUMENTAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

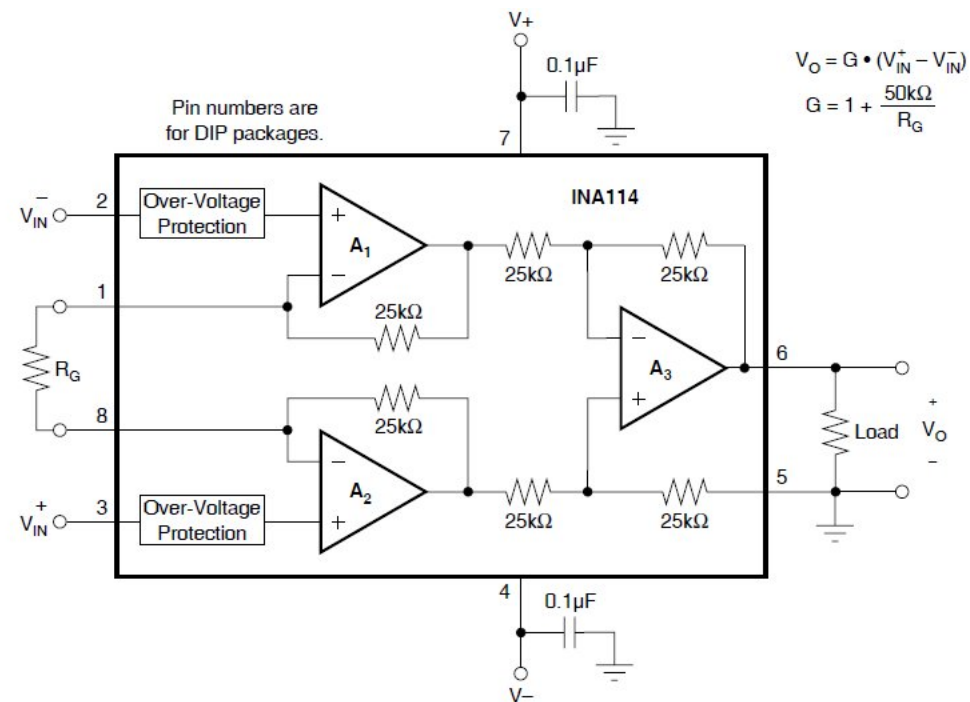
5.1 – INSTRUMENTAÇÃO

Amplificação

INA 114

Circuito interno do amplificador de instrumentação.

Função do ganho, de 1 a 50k.



CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 5 - INSTRUMENTAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

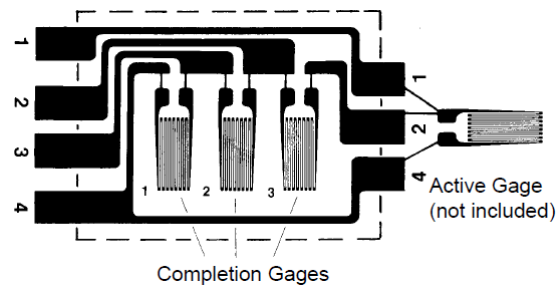
5.1 - INSTRUMENTAÇÃO

Circuito para fechar a ponte.

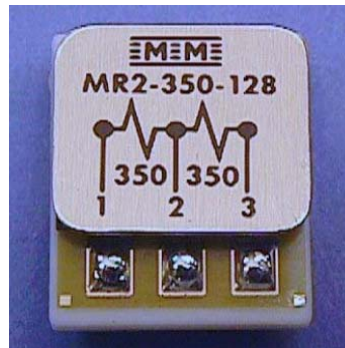
Podem ser usados resistores de precisão internos ao SCAD, ou usar placas especiais junto ao SG, ou próximas ao mesmo.

Exemplo de circuito para fechar a ponte:

Caso de uma aplicação de 1/4 de ponte, a três fios, BLH.



Caso de uma aplicação de 1/2 de ponte, MM.
Alimentação da ponte de 0,4 a 18 V.



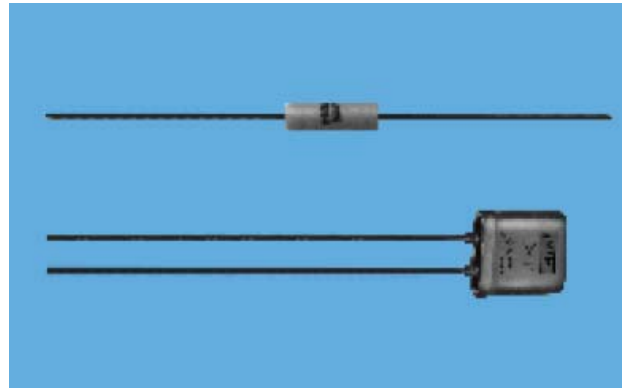
CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 5 – INSTRUMENTAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

5.1 – INSTRUMENTAÇÃO

Circuito para fechar a ponte.

Resistores de precisão



Resistor de fio

Temperature Coefficient

20 ppm/°C; 0° to 60°C

Stability

30 ppm/year maximum drift

Wattage

0.3 at 75°F (24°C)

Construction

Noninductive windings. Encapsulated for use in normal laboratory environment.

Resistor blindado

Temperature Coefficient

1 ppm/°C; 0° to 60°C

Stability

5 ppm/year maximum drift

Wattage

0.25 at 75°F (24°C)

Construction

Hermetically sealed in metal case. Excellent long-term stability.

Uma estabilidade do valor da resistência de 5 ppm por ano caracteriza uma deformação aparente de $2,5 \cdot 10^{-6}$, para $k=2$.

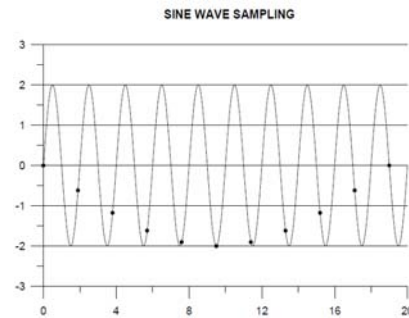
CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 5 – INSTRUMENTAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

5.1 – INSTRUMENTAÇÃO

Taxa de aquisição.

A frequência de aquisição com que os dados são amostrados, por exemplo, quando da multiplexação, deve estar diretamente relacionada com a dinâmica do sinal a ser medido, ou seja, ao conteúdo de frequência deste sinal, em particular à maior frequência que é relevante.



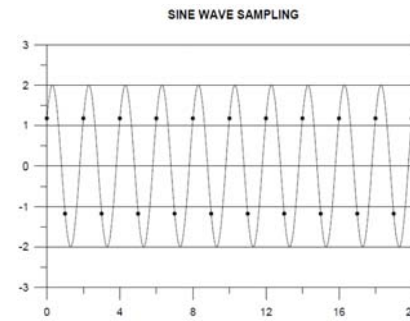
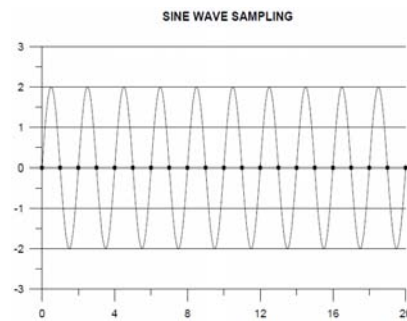
Exemplo de amostragem com frequência de aquisição levemente superior à frequência do sinal. Importante é a relação entre as duas frequências, aquisição e sinal, f_a/f_s .

CURSO EXTENSOMETRIA

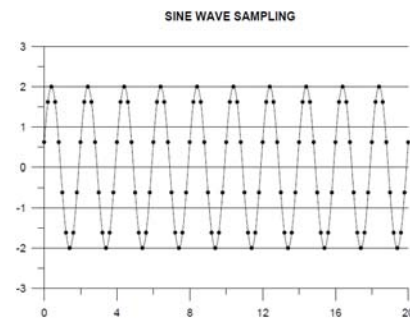
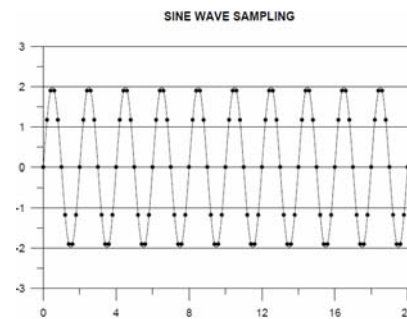
AULA 5 – INSTRUMENTAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

5.1 – INSTRUMENTAÇÃO

Taxa de aquisição.



Casos com $f_a/f_s = 2$.



Casos com $f_a/f_s = 10$.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 5 – INSTRUMENTAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

5.1 – INSTRUMENTAÇÃO

Taxa de aquisição.

O maior erro na medida da amplitude do sinal ocorre com pontos de amostragem simétricos em relação ao pico.

O erro relativo para este caso, considerando um sinal harmônico, é dado por

$$e = 1 - \cos\left(\frac{\pi}{f_a/f_s}\right)$$



Relação f_a / f_s	Erro máximo
2	1.000
5	0.191
10	0.0489
20	0.0123
50	0.00197
100	0.00049

Para 1% de erro na amplitude, a frequência de aquisição deve ser pelo menos 20 vezes maior do que a máxima frequência presente no sinal.

Multiplexação

Permite a aquisição de vários canais, pela leitura seqüencial das informações, usando um único conversor AD, em geral o componente de maior custo do sistema.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 5 – INSTRUMENTAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

5.1 – INSTRUMENTAÇÃO

Conversão AD

Converte o sinal analógico já amplificado em sinal digital. Além da frequência com que é feita a amostragem é importante também estabelecer o número de bits nesta conversão. Define a resolução que se tem no sinal digital. Sistemas mais recentes trabalham em 24 bits.

Número de bits	Resolução
10	1:1 024
12	1:4 096
14	1:16 384
16	1:65 536
20	1:1 048 576
24	1:16 777 216

Padrões de comunicação

Comunicação com sinal analógico amplificado.
Simples, mas sujeito a interferências.
Padrões 0/5 V; 0/10 V, ± 10 V, 0/20 mA, 4/20 mA,...

Comunicação com sinal digital.

Requer o conversor AD e circuito de comunicação.
Padrões RS 232, USB 2.0, ...

Comunicação sem fio.

Usa sinal de radio frequência, típico de telemetria.
Padrões a 900 MHz, 2.4 GHz, Zig Bee, Bluetooth, ...

Em instalações industriais existe a necessidade de isolamento elétrico, o que é feito através de um acoplamento óptico.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 5 – INSTRUMENTAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

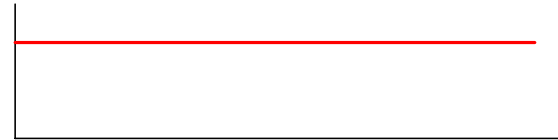
5.1 – INSTRUMENTAÇÃO

Alimentação

Alimentação DC.

Leitura com sinais de alta
frequência

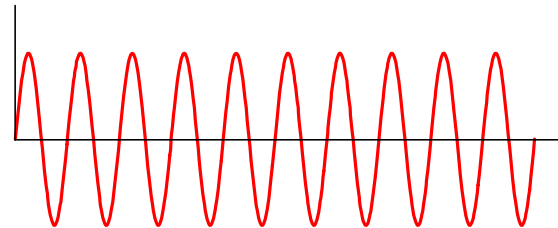
Sensível a interferências
eletromagnéticas



Alimentação AC.

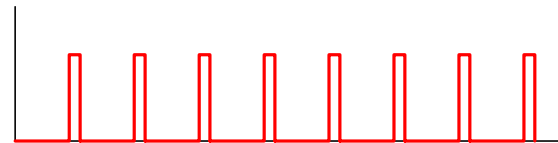
Usa frequência portadora
Mais imune a interferência

Limite na frequência do sinal



Alimentação pulsada.

Para sinais de baixa frequência
Permite uma maior tensão na ponte,
sem provocar muito aquecimento

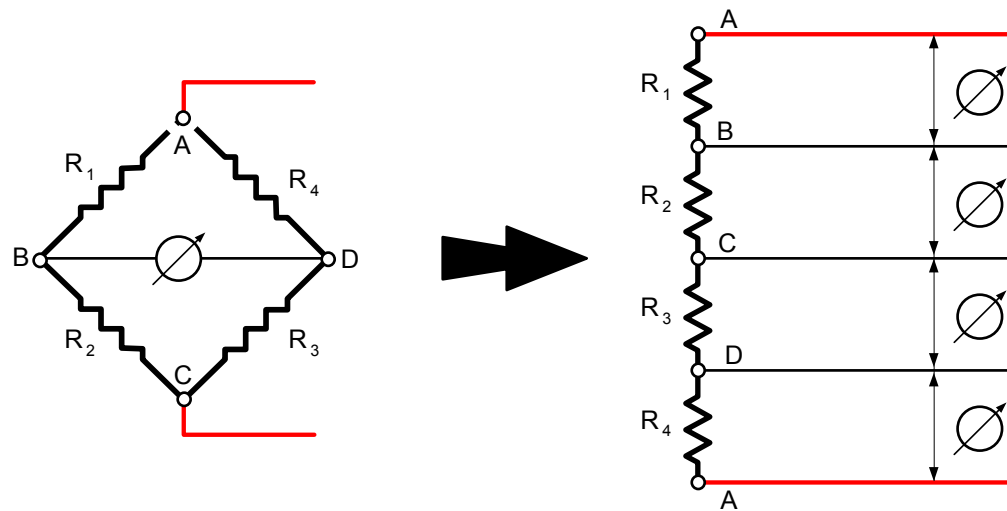


CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 5 – INSTRUMENTAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

5.1 – INSTRUMENTAÇÃO

Alimentação por laço de corrente, Anderson loop, NASA.
Maior flexibilidade do que a ponte de Wheatstone tradicional.
Sinais individualizados de cada SG, não o efeito sobreposto.
Hardware de aquisição é mais complexo, não comercial.



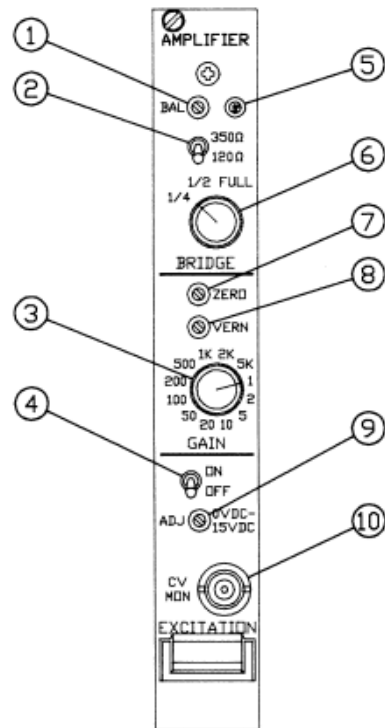
CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 5 – INSTRUMENTAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

5.2 – SISTEMAS COMERCIAIS

Exemplo de sistema comercial

Omega DMD-519



DMD-519 Single Channel High Performance Strain Gage Amplifier

- 1 - Manual bridge balance trimpot
- 2 - Bridge completion resistor value
120 / 350 ohms
- 3 - Fixed gain selector switch
1x / 5kx
- 4 - Bridge excitation On/Off switch
- 5 - Autobalance LED indicator
- 6 - Bridge configuration switch
1/4, 1/2, full bridge
- 7 - Amplifier zero trimpot
- 8 - Fixed gain attenuator
- 9 - Bridge excitation adjustment trimpot
0 to 15 V
- 10 - BNC bridge excitation monitor

Frequency response DC to 100 kHz (-3dB)
Output $\pm 10V$ @ 100 mA.

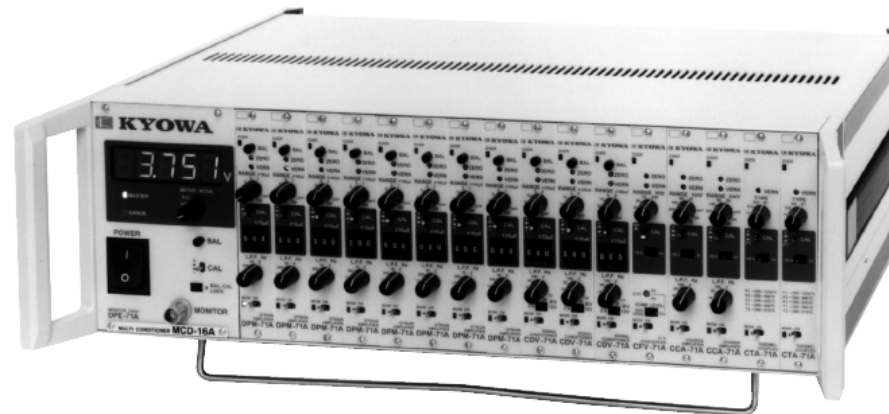
CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 5 – INSTRUMENTAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

5.2 – SISTEMAS COMERCIAIS

Exemplo de sistema comercial

Kyowa MCD 16A



HBM Spider 8



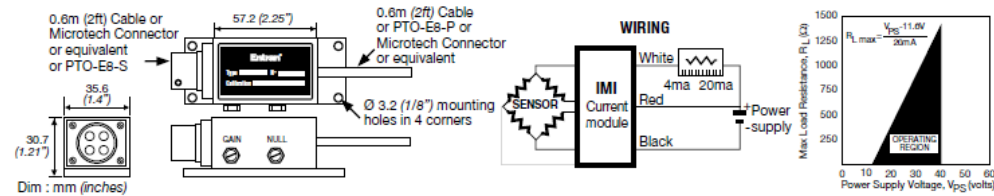
CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 5 – INSTRUMENTAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

5.2 – SISTEMAS COMERCIAIS

Amplificador Entran, saída de corrente, 4-20 mA.

IMI Amplifier - Current Output



Amplifier Performance

GAIN (G) $\pm 5\%$:	Externally adjustable $\pm 10\%$ min.: 0.1A=0.1mA/mV 0.5A=0.5mA/mV Fixed Gain : 0.016 to 1.6mA/mV available Matched to a specific sensor : 420M=Gain set to yield 4 to 20mA output (adjustable $\pm 10\%$ min.) (12 to 800mV input allowable)
POWER REQUIRED:	10 to 40V
OUTPUT SIGNAL:	4 to 20 mA
OUTPUT CURRENT max.:	28mA
INPUT IMPEDANCE nom.:	10G Ω (Common Mode)
BASE LINE (NULL) ADJUSTABILITY:	$\pm 10\%$
NON-LINEARITY:	0.01%

Supply For Sensors, General Characteristics, Options & Accessories

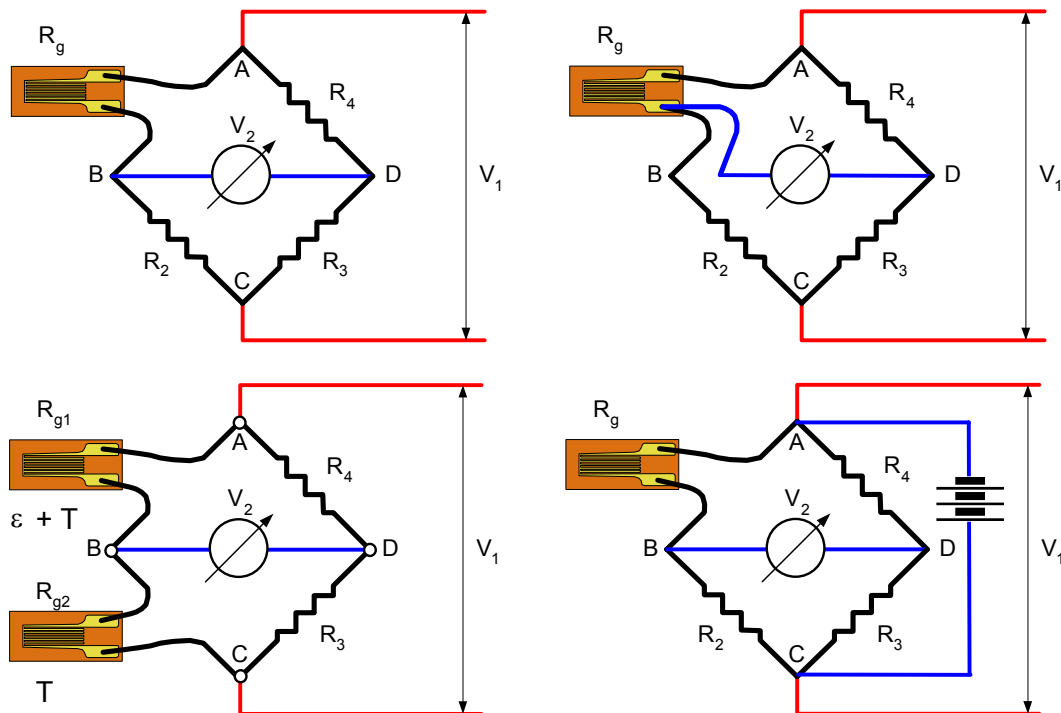
SENSOR SUPPLY VOLTAGE:	10 = 10V
SENSOR SUPPLY CURRENT max.:	1.5A
SENSOR OUTPUT COMMON MODE:	Must be 5V $\pm 1V$
COMMON MODE REJECTION:	90dB
INPUT PROTECTION:	Reverse Polarity Protected
OUTPUT PROTECTION:	Short Circuit Protected
OPERATING TEMPERATURE:	-29°C to 82°C (-20°F to 180°F)
STORAGE TEMPERATURE:	-40°C to 120°C (-40°F to 250°F)
WIRING:	W = Shielded cable 1 = Microtech type connector or equivalent (female input, male output) with unwired mate 4 = PTO-E8-S connector if input, without mate PTO-E8-P connector if output, without mate
SPECIAL OUTPUT CABLE LENGTH TYPE W:	L00F = Replace "00" with total length in feet. L00M = Replace "00" with total length in meters.
CONNECTOR WIRED TO OUTPUT CABLE TYPE W:	C = Microtech type male or equivalent (w/o mate) RS = RJ Telephone type male (w/o mate)
WIRE AMPLIFIER INPUT TO A SENSOR:	WI = Wire to sensor

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 5 – INSTRUMENTAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

5.3 – ANÁLISE DE ERROS

Fiação a 2, 3, 4 e 6 fios



Na ponte a seis fios o circuito mede exatamente a tensão de alimentação da ponte, independente da resistência dos cabos e da estabilidade da alimentação. Como a tensão é medida com alta impedância a resistência dos cabos não afeta a medida.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 5 – INSTRUMENTAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

5.3 – ANÁLISE DE ERROS

Outros efeitos

Os principais fenômenos físicos que podem introduzir ruídos podem ser classificados em duas grandes classes:

Alteração do valor da resistência do extensômetro.

- Temperatura (efeito termoresistivo);
- Pressão hidrostática (efeito Bridgman);
- Campo magnético (resistividade magnética);
- Intensidade luminosa (foto-resistividade, em semicondutores);
- Umidade (cerâmicas);
- Radiação (encruamento por bombardeio de neutrons);

Geração de voltagem dentro da ponte extensométrica.

- Efeitos termoelétricos (Peltier, Thomson, Seebeck);
- Campo magnético (mudança da intensidade do campo);
- Tensão induzida por deformação (materiais ferromagnéticos);
- Efeito triboelétrico (nos cabos de conexão);
- Interferência eletro-estática;
- Efeito piezo-elétrico do suporte do SG.

Efeitos mais usuais são:

Na ponte:

- Interferência eletromagnética
- Interferência eletrostática

Na fiação

- Aquecimento desigual de braços da fiação
- Interferência eletromagnética
- Interferência eletrostática

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 5 – INSTRUMENTAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

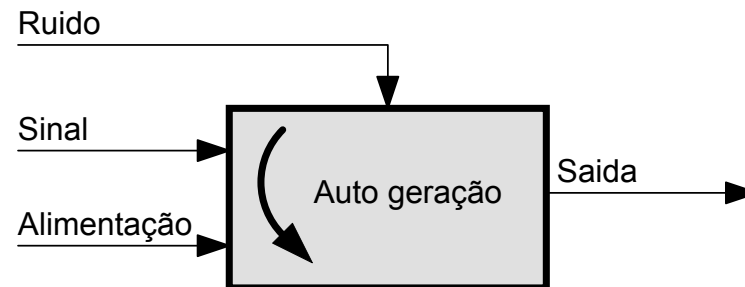
5.3 – ANÁLISE DE ERROS

Metodologia de análise de erros

O desejado em qualquer sistema de medição é que a saída seja proporcional ao sinal e independente de qualquer outro efeito.

Na prática tal não ocorre e os efeitos indesejados devem ser reduzidos ao máximo, ou ao menos conhecidos e quantificados.

	Alimentação On	Alimentação Off
Entrada On	Saída desejada	Auto geração
Entrada Off	Ruido	Auto geração

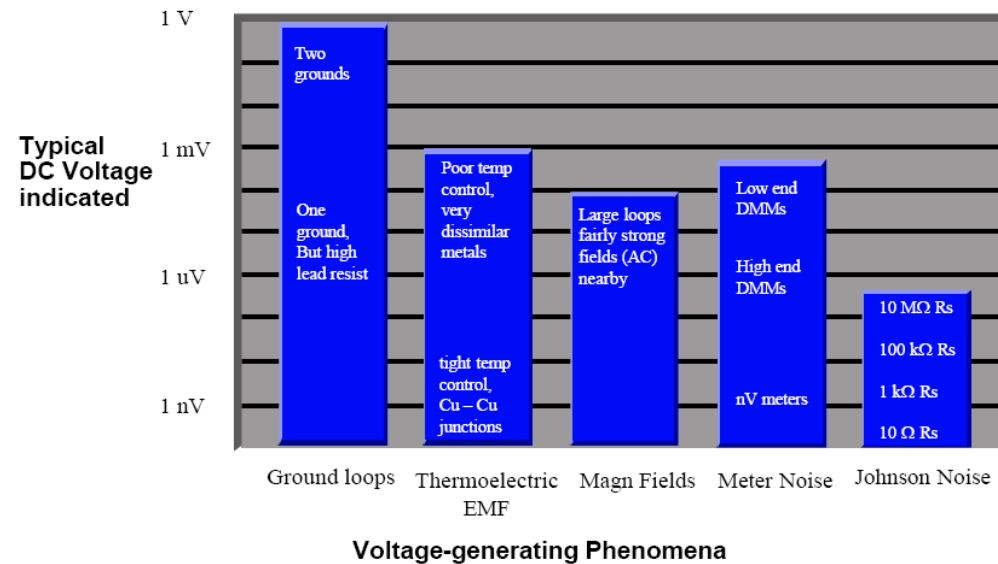


CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 5 – INSTRUMENTAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

5.3 – ANÁLISE DE ERROS

Valores comparativos das diferentes fontes de geração de um potencial elétrico.



Força eletromotriz gerada pelo efeito Seebeck

Paired Materials*		Seebeck Coefficient, Q_{AB}	
Cu - Cu		=0.2 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	
Cu - Ag		0.3 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	
Cu - Au		0.3 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	
Cu - Pb/Sn		1–3 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	
Cu - Si		400 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	
Cu - Kovar		40–75 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	
Cu - CuO		1000 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	
* Ag = silver	Au = gold	Cu = copper	CuO = copper oxide
Pb = lead	Si = silicon	Sn = tin	

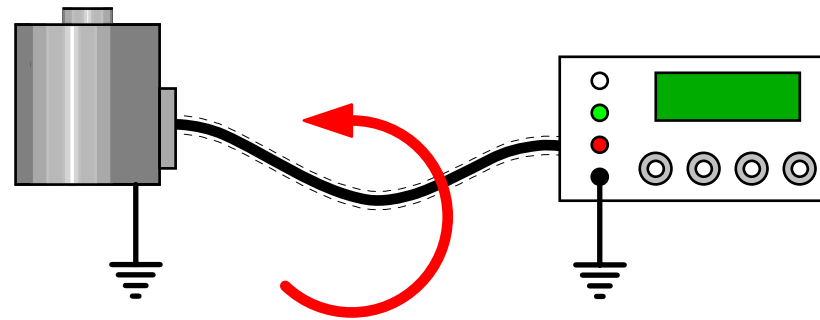
CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 5 - INSTRUMENTAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

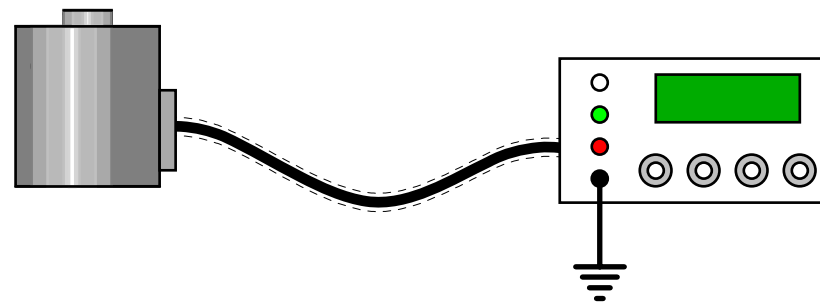
5.3 - ANÁLISE DE ERROS

Laço de terra gera corrente devido à diferença de potencial entre dois pontos da malha de medição.

Exemplo, célula de carga aterrada e SCAD também, com cabo blindado fechando o circuito.



Uso de um único terra, comum a todos os instrumentos e transdutores.



CURSO EXTENSOMETRIA

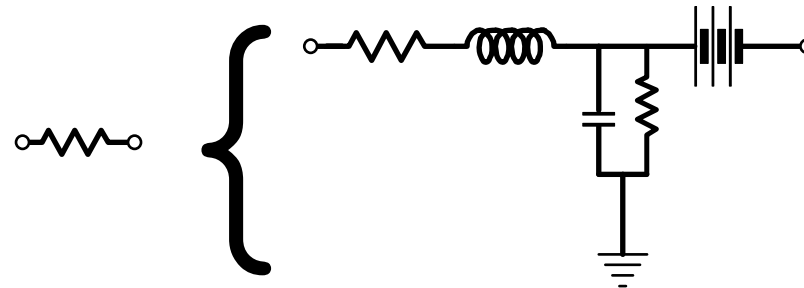
AULA 5 – INSTRUMENTAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

5.3 – ANÁLISE DE ERROS

Metodologia de análise de erros

Concluindo, o extensômetro não é apenas um resistor que tem seu valor da resistência afetado pela deformação e temperatura.

O extensômetro também funciona como um indutor e como um capacitor, tendo ainda uma resistência à terra, podendo ainda funcionar como gerador de uma FEM interna.



Função resposta em frequência do extensômetro:

- Elétrica, depende do tipo de alimentação;
- Mecânica, depende da fixação no material de base.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 6 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

Planejamento do trabalho

- Objetivos do ensaio de AExT
- Objetivos do transdutor
- Número de pontos e tipo de informação
- Escolha do local e orientação do SG

Seleção do SG e da instrumentação

- Escolha do tipo de SG para uma dada aplicação
- Escolha das características da ponte
- Escolha da fiação

Aplicação de SG

- Escolha do local e orientação do SG
- Preparo do SG para aplicação
- Preparo do local de aplicação
- Preparo da fiação
- Aplicação do SG
- Proteção da aplicação
- Verificação da qualidade da aplicação

Casos especiais

- Força centrífuga
 - Ambiente agressivo
-

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 6 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

6.1– PLANEJAMENTO

Planejamento da aplicação

Se análise de tensões, em geral aplicação de curto prazo.
Estabilidade e calibração para medidas confiáveis.

Se uso em transdutor, em geral aplicação de longo prazo.
Estabilidade mais crítica.
Calibração com padrão metrológico.

Método 5W 1H, na análise experimental de tensões

O que - $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \epsilon_{xy}, \epsilon_\alpha, \epsilon_\beta, \epsilon_\gamma, N\epsilon_x, N\epsilon_y, \sigma_x, \sigma_1, \sigma_{eq}, \sigma_{xy}$, etc.

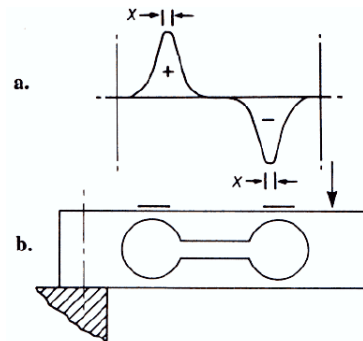
Como - Escolha do método mais indicado à aplicação.

Onde - Local no ponto de falha, para validar FEA, para σ_0 , etc

Quando - Escolha da frequência de amostragem.

Quem - Tipo do SG. Alimentação da ponte.

Porque - Qual o objetivo.

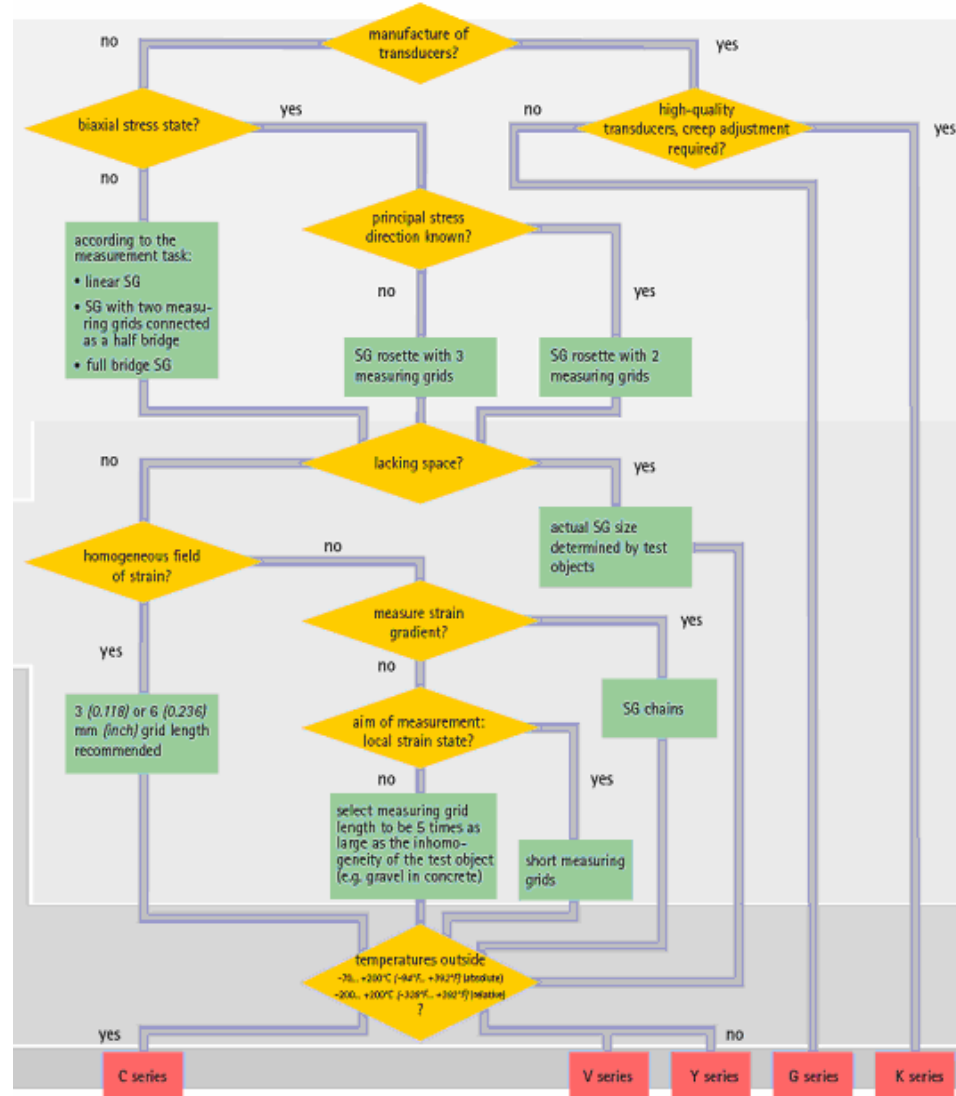


CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 6 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

6.2 – SELEÇÃO DO SG

Escolha do tipo de SG



CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 6 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

6.2 – SELEÇÃO DO SG

Tamanho:

- Gradiente de deformação;
- Região de máxima deformação;
- Precisão necessária;
- Estabilidade da medida estática;
- Deformação máxima a ser medida;
- Resistência à fadiga;
- Espaço disponível para a instalação;
- Facilidade de instalação.

Tipo de grade:

- Gradiente de deformações, no plano e normal à superfície;
- Estado de tensões;
- Dissipação térmica;
- Espaço para instalação;
- Valores de resistência disponível.

Tipo do extensômetro:

- Medida estática, dinâmica, grande deformação..;
- Temperatura de trabalho;
- Duração dos ensaios;
- Vida de fadiga;
- Precisão desejada;
- Ambiente da instalação;
- Capacidade de solda com SG montado;
- Limitações no tempo de instalação do SG;
- Efeito do comprimento de cabos;
- Relação sinal-ruído;
- Material da estrutura a ser ensaiada.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 6 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

6.2 – SELEÇÃO DO SG

Escolha do extensômetro

Tipo do SG

Um extensômetro uniaxial é usado quando a direção principal do campo de deformações é plenamente conhecida.

Eventualmente podem ser usados extensômetros uniaxiais, montados em diferentes direções, simulando uma roseta.

Uma roseta 0-90 deve ser usada para situações com direções principais bem conhecidas. No caso de transdutores muitas vezes é usada para aumentar a sensibilidade.

Um caso particular são as rosetas $\pm 45^\circ$, típicas para problemas de tensões cisalhantes.

Rosetas de três eixos são usadas para casos gerais quando o estado de tensões deve ser obtido. Alguns tipos de rosetas são para geometrias de canto, ou quando o local é muito restrito.

Tamanho do SG

Para aplicações gerais a recomendação é para extensômetros com tamanho entre 3 e 6 mm, pela questão de qualidade da aplicação e facilidade de manuseio.

Um extensômetro menor se justifica para situações de problemas de espaço, acesso, ou quando ocorrem campos com fortes gradientes. A precisão de medida passa a ser comprometida.

Um extensômetro maior facilita a aplicação, desde que haja disponibilidade de espaço. Uma melhor dissipação de calor é também obtida. É indicado para casos nos quais uma grande estabilidade é necessária. Para materiais com heterogeneidades macroscópicas recomenda-se um comprimento várias vezes maior que o tamanho destas, de modo a medir um valor médio de deformação e não local.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 6 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

6.2 – SELEÇÃO DO SG

Escolha do extensômetro

Material da grade

A liga mais usada é cobre-níquel, o Constantan, com mais de 90% dos extensômetros. Como é muito comum apresenta um baixo custo. Não é recomendado para casos extremos de temperatura. Quando no estado recosido permite trabalhar com deformações acima de 5%. Permite customizar suas propriedades para permitir a autocompensação de temperatura.

A liga cromo níquel denominada Karma é popular para a fabricação de transdutores e para baixas temperaturas mais extremas. Permite autocompensação de temperatura, porém apresenta dificuldades para a solda da fiação.

Os extensômetros com grade em níquel, Manganina e Balco são mais usados para completar a aplicação, como resistores de ajuste do ponto de zero e de compensação de temperatura, tanto para o ponto de zero como para correção de faixa de medidas.

Resistência do extensômetro

A maioria dos extensômetros é fabricada em 120 Ω e 350 Ω . Uma baixa resistência é menos sensível a variações de resistência do isolamento, porém mais sensível ao processo de aquecimento.

Uma resistência maior reduz o efeito Joule, são menos sensíveis também à resistência dos cabos. Apresentam no entanto mais possibilidade de sofrer interferência eletromagnética, são antenas mais eficientes.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 6 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

6.2 – SELEÇÃO DO SG

Escolha do extensômetro

Material da base

Para aplicações em análise de tensões o material mais usado é a polyimida, com espessura na faixa de 0,040 mm ou menos. Tem limitações de temperaturas, mas para situações corriqueiras é a escolha natural.

Epóxi reforçado com fibra de vidro é o material de base padrão para uso em transdutores, apresentando uma estabilidade maior.

Para aplicações em alta temperatura podem ser usados extensômetros soldáveis, montados sobre base metálica, ou ainda extensômetros de fio, abertos e montados na aplicação por spray de material cerâmico, que já funciona como adesivo. .

Tipo de adesivo

Adesivos para análise experimental de tensões:

Cura a temperatura ambiente;

Cura a alta temperatura.

Tempo de cura;

Tempo de estabilidade da aplicação.

Adesivos para transdutores:

Cura a alta temperatura;

Camada muito fina de adesivo;

Tratamento de pós-cura;

Grande estabilidade no tempo.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 6 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

6.2 – SELEÇÃO DO SG

Escolha do local e tipo de informação.

Valor nominal da tensão, foco na solicitação externa.

Caso de transdutor, exige calibração.

Acoplamento, sensibilidade cruzada.

Uso de transdutor diretamente.

Instrumentar parte da estrutura e fazer calibração.

A estrutura passa a funcionar como transdutor.

Valor local da tensão.

Caso da análise experimental de tensões.

Valor local da tensão, ou estado de tensões no ponto.

Estudo do gradiente de tensões.

Escolha de local para caracterizar a tensão nominal.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 6 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

6.2 – SELEÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO

Escolha das características da instrumentação

Tipo de alimentação, DC, AC, pulsada;

Valores de voltagem de alimentação;

Frequência de aquisição;

Capacidade de trabalhar com a configuração de ponte desejada;

Número de canais necessários;

Sistema multiplexado ou em paralelo;

Conversão AD, N° de bits;

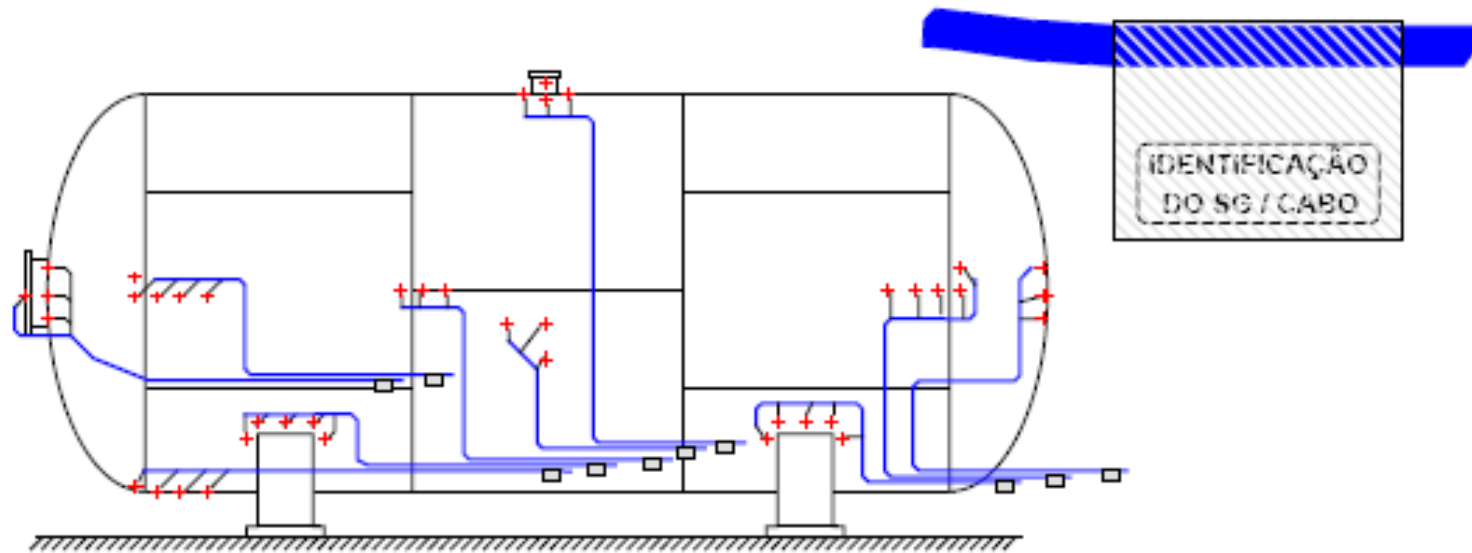
Zero por hardware ou software, estabilidade;

Filtros analógicos, digitais;

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 6 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

6.3 – APLICAÇÃO DE SG

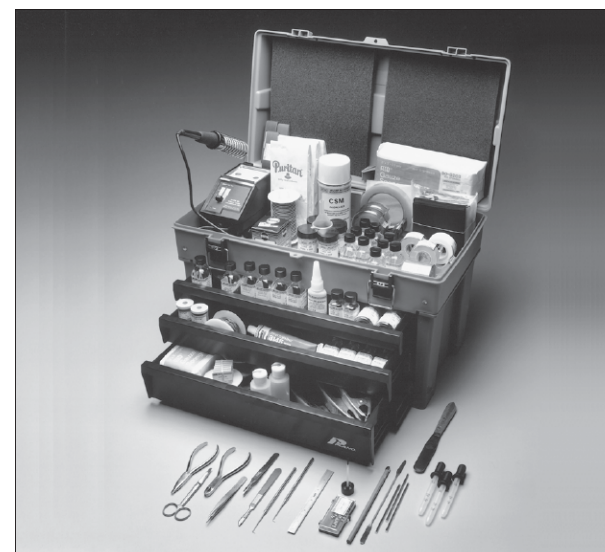


Mais recentemente é possível fazer a identificação usando a tecnologia TEDS, com o correspondente hardware junto a cada extensômetro.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 6 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

6.3 – APLICAÇÃO DE SG



CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 6 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

6.3 – APLICAÇÃO DE SG

Escolha do local e orientação do SG

Uso de conhecimento prévio do problema para estabelecer o número de pontos a medir e sua localização.

Métodos de campo da AExT, ou análise FEA.

Preparo do SG para aplicação

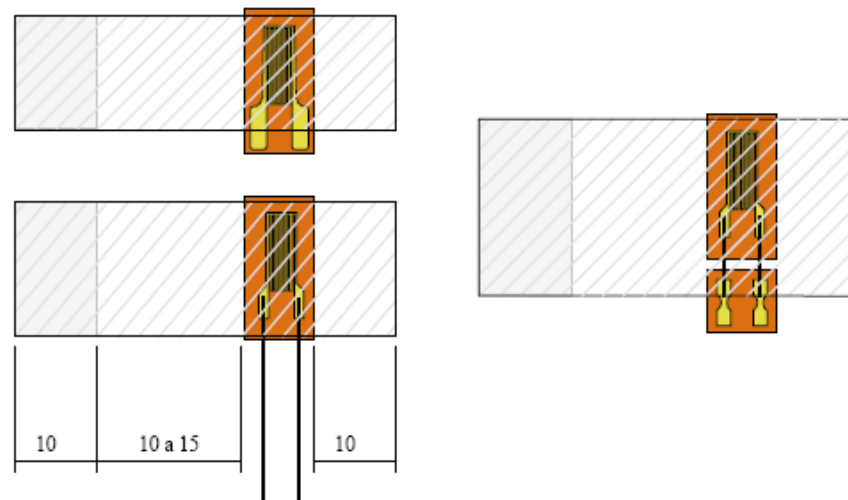
É essencial para aplicações em campo.

Quando fora do ambiente controlado de laboratório.

Montagem do SG em material próprio.

Útil para transporte, manipulação e aplicação.

Preparo preliminar da fiação.

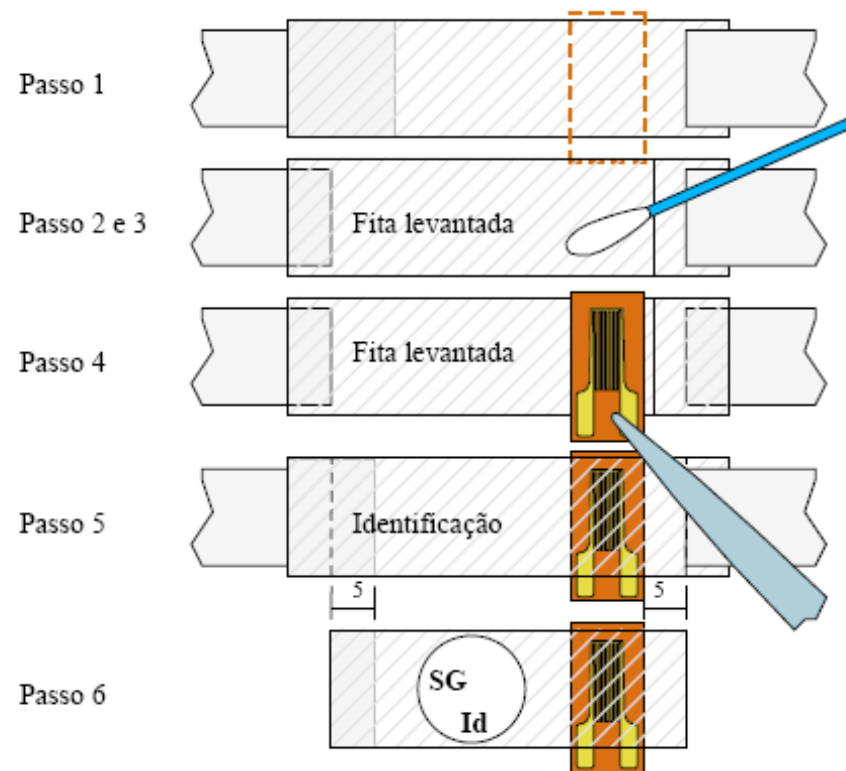


CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 6 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

6.3 – APLICAÇÃO DE SG

Preparo do SG para aplicação

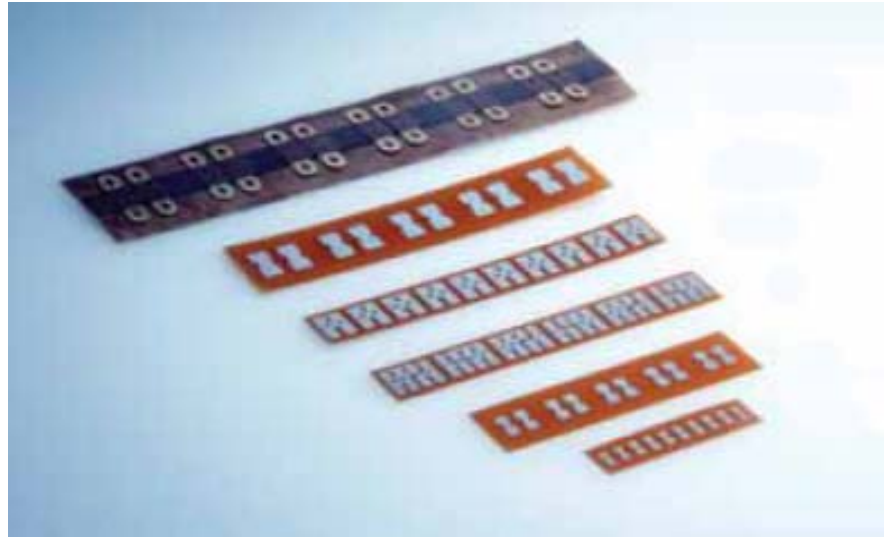


CURSO EXTENSOMETRIA

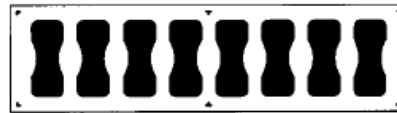
AULA 6 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

6.3 – APLICAÇÃO DE SG

Terminais



Terminais comuns



Terminais especiais para ligação a três fios.

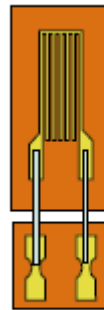


CURSO EXTENSOMETRIA

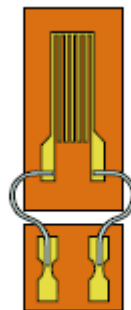
AULA 6 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

6.3 – APLICAÇÃO DE SG

Preparo do SG para aplicação



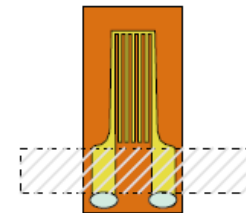
Direto



Laço lateral



Laço vertical

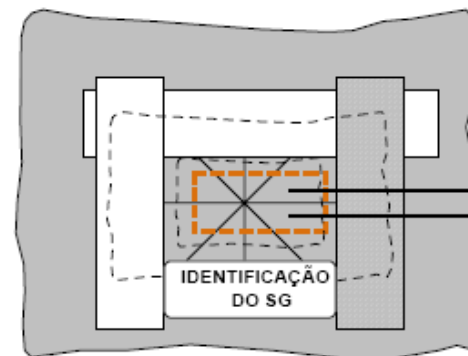
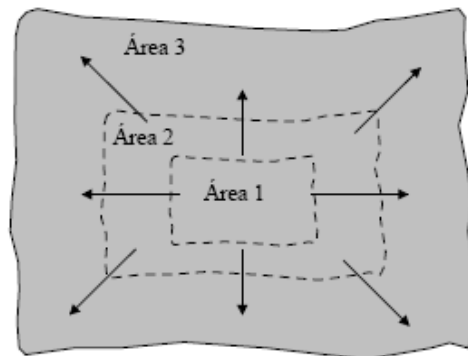


Preparo do local de aplicação

Limpeza bruta

Limpeza fina

Limpeza final

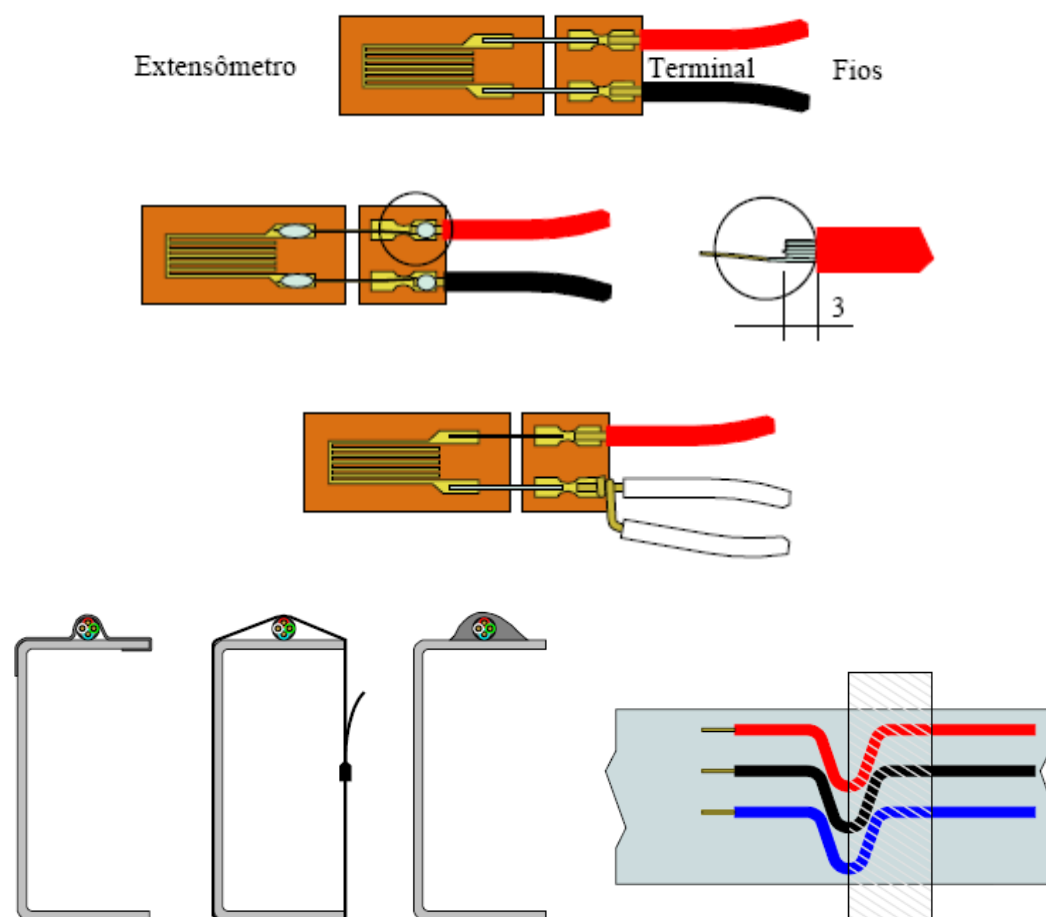


CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 6 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

6.3 – APLICAÇÃO DE SG

Preparo da fiação

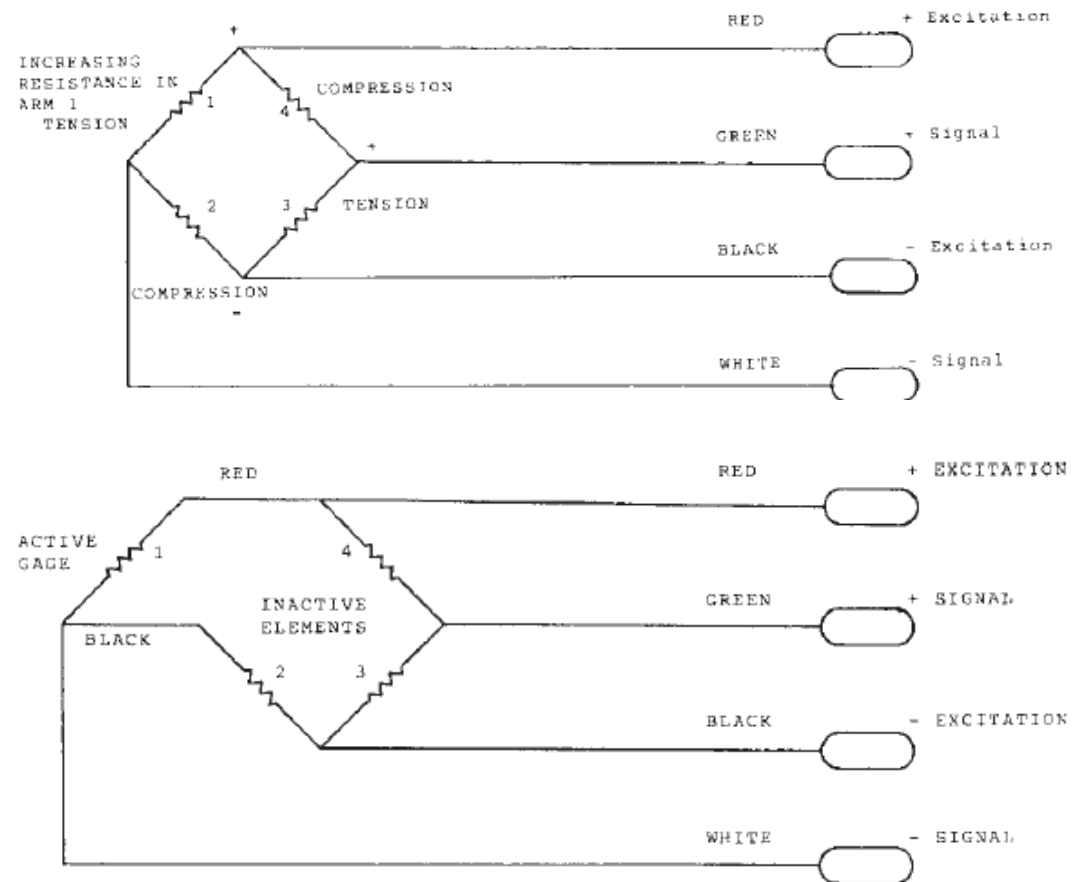


CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 6 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

6.3 – APLICAÇÃO DE SG

Código de cores da fiação



CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 6 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

6.3 – APLICAÇÃO DE SG

Escolha da fiação

A fiação interna à ponte de Wheatstone recomenda-se que seja feita com fio rígido, de bitola compatível com os terminais. Isto evita que ocorra alteração de resistência interna, o que ocorreria com a ruptura parcial de fios flexíveis.

A fiação externa à ponte deve ser feita com fio flexível, para permitir o manuseio adequado do mesmo, sem perigo de ruptura. A bitola deve ser tal que a resistência total do cabo seja menor que 1% da resistência do extensômetro.

Para configuração de quarto de ponte sempre usar conexão a três fios.

TABELA DE BITOLAS PADRÃO AWG

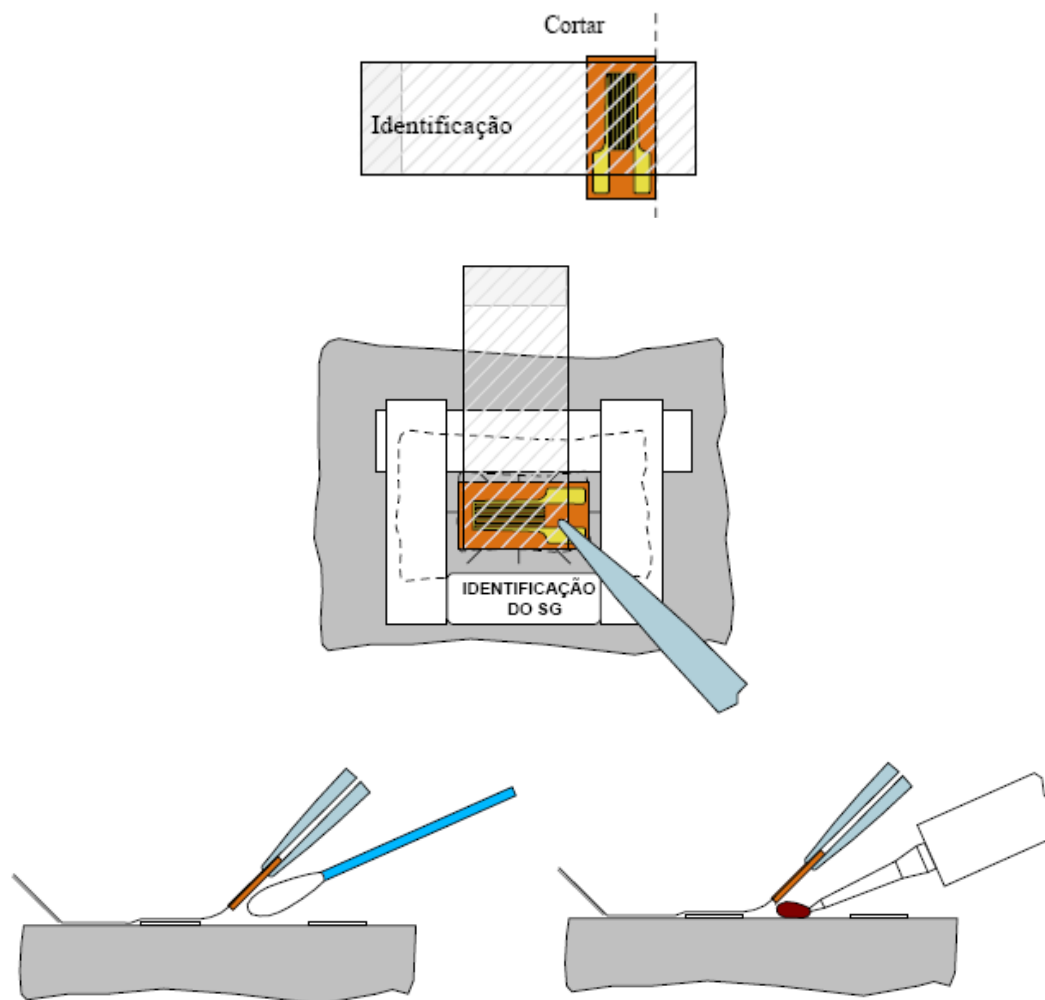
Bitola	Diâmetro	Diâmetro	Área	Resistência	Resistência	Resistência	Resistência
AWG	Inches	mm	mm ²	Ω /m	Ω /m	Ω /m	Ω /m
				Cobre	Constantan	NiCr 80	NiCr 60
				$\rho = 0.01724$	$\rho = 0.490$	$\rho = 1.0874$	$\rho = 1.1292$
16	0.050820	1.291	1.30901	1.31710E-2	0.3743283	0.8307033	0.8626359
20	0.031960	0.8118	0.51759	3.33099E-2	0.9466884	2.100875	2.181634
24	0.020100	0.5105	0.20468	8.42326E-2	2.393942	5.312597	5.516815
28	0.012640	0.3211	8.0978E-2	0.2129075	6.050964	13.42820	13.94438
32	0.007950	0.2019	3.2015E-2	0.5385163	15.30497	33.96454	35.27015
36	0.005000	0.1270	1.2667E-2	1.361019	38.68100	85.84025	89.13998

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 6 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

6.3 – APLICAÇÃO DE SG

Aplicação do SG



CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 6 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

6.3 – APLICAÇÃO DE SG

Tipos de adesivos

Adesivos de cura à temperatura ambiente

São os de uso mais simples, para situações que não exigem grande precisão ou grande durabilidade da aplicação. Típico para casos de análise experimental de tensões. Podem ser do tipo CA ou PMMA.

Adesivos de cura a quente

São os adesivos mais comuns para aplicações em transdutores, que requerem uma grande durabilidade e estabilidade da aplicação. Sempre requerem uma cura em estufa com ciclo térmico controlado. Em aplicações de grande exigência um segundo ciclo de cura pode ser necessário. A grande maioria destes adesivos são a base de resinas epóxi.

Adesivos para aplicações a alta temperatura

Quando os extensômetros devem ser usados em alta temperatura os adesivos passam a ser um ponto crítico. Até 300 °C adesivos poliméricos especiais podem ser usados. Acima desta temperatura adesivos a base de cerâmica são necessários. Outra possibilidade é soldar o extensômetro, montado sobre uma base metálica, diretamente no componente.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 6 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

6.3 – APLICAÇÃO DE SG

Tipos de adesivos

Adhesive	Description	Suitable SG	Pot life at room temperature	Storage time	Curing temperature	Curing period ²⁾	Contact pressure (N/mm ²)	lower	Temperature limits upper absolute ¹⁾	upper relative ²⁾
cold curing Z 70 Order no.: 1-Z 70 for optional use with Z 70 BCY 01	single component adhesive Cyanoacrylate thin liquid accelerator for Z 70	optimum: Y, C, LD, LE, V residual stress strain gages good: K, G	—	6 months at – 15°C: almost unlimited	5°C ³⁾ 20°C 30°C	10 minutes 1 minute 0.5 minutes	thumb pressure	– 55°C (temporarily – 70°C)	+ 100°C	+ 120°C
X 60 Order no.: 1-X 60	two component adhesive Polymethyl Methacrylate pasty, even on absorbent or uneven surfaces	optimum: Y, C, LD, DA, V residual stress strain gages good: K, G, LS	5 minutes	> 1 year	0°C 20°C 35°C	60 minutes 10 minutes 2 minutes	thumb pressure	– 200°C	+ 60°C	+ 80°C
X 280 Order no.: 1-X 280	two component epoxy resin adhesive	optimum: Y, C, LD, LE, V good: G, K for smooth and absorbent surfaces	30 minutes	1 year at + 4°C	RT ... 95°C	8 h ... 1 h	0.05 ... 2.0	– 70°C	+ 200°C	+ 280°C
hot curing EP 310 S Order no.: 1-EP 310 S	two component epoxy resin adhesive thin liquid	optimum: Y, C, K, G, LD, LE good: residual stress SG	1 month (at RT) 6 months (at + 2°C) 12 months (at – 32°C)	6 months	95 ... 205°C	5 h ... 0.5 h	0.1 ... 0.5	– 270°C	+ 260°C	+ 310°C
EP 250 Order no.: 1-EP 250	two component epoxy resin adhesive pasty, even on absorbent surfaces	optimum: Y, C, K, G, LD, LE good: residual stress SG	24 h	1 year	95 ... 200°C	16 h ... 0.5 h	0.1 ... 1.5	– 240°C	+ 250°C	+ 315°C

¹⁾ zero-point related measurement

²⁾ non zero-point related measurement

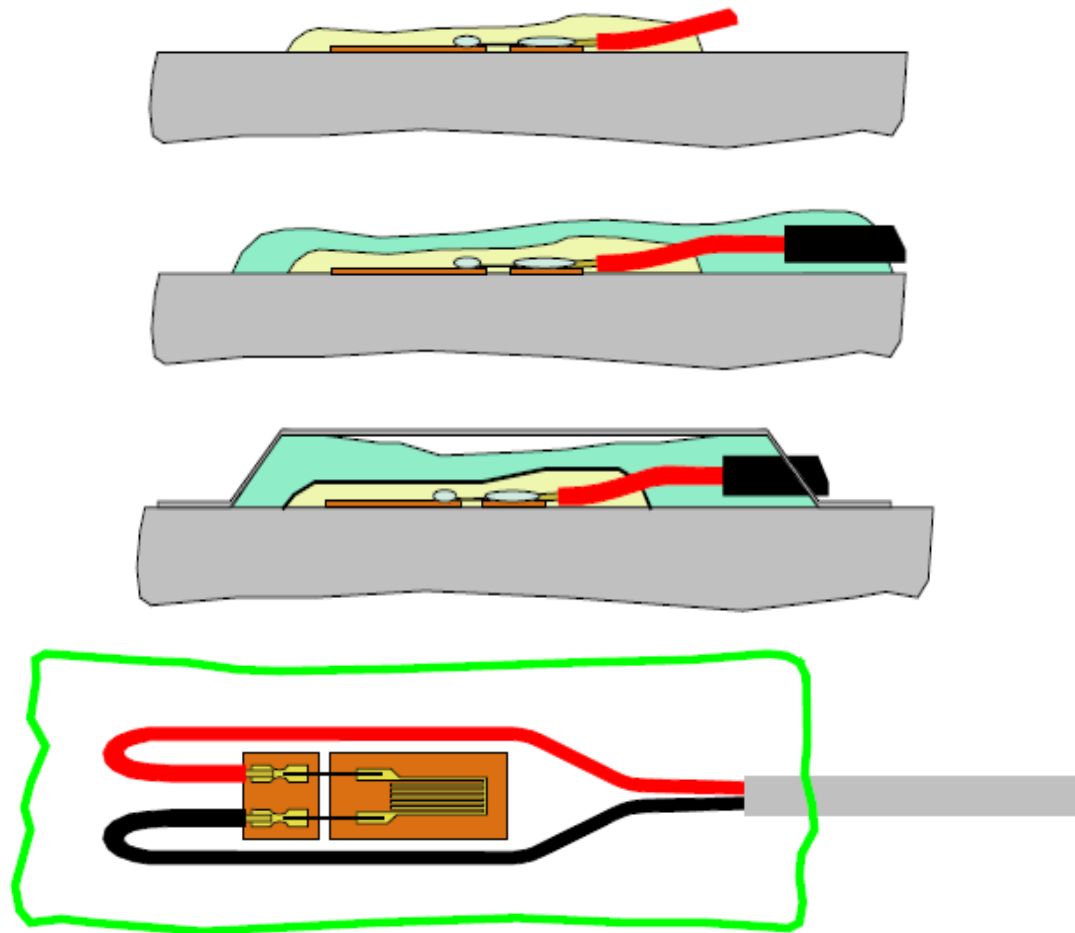
³⁾ curing conditions: relative humidity between 30-80%

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 6 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

6.3 – APLICAÇÃO DE SG

Proteção da aplicação



CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 6 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

6.3 – APLICAÇÃO DE SG

Tipos de proteção da aplicação

Strain gage covering agent	Temperature range of resistance in air in °C	Package contents	One package suffices for approx.	Application method	Curing conditions	Storage capability at room temperature	Components
AK 22 viscous putty Order no.: 1-AK 22	– 50 ... + 170	1 kg	30 strain gages	kneading on by hand	–	unlimited	viscous, kneadable sticky putty
ABM 75 aluminum foil c/w knead. compound Order no.: 1-ABM 75	– 196 ... + 75	11 pcs. 205 mm x 100 mm	200 strain gages	pressing on by hand	–	unlimited	0.05 mm thick aluminum foil, coated with 3 mm thick kneading compound
NG 150 ¹⁾ nitrile rubber Order no.: 1-NG 150	– 269 ... + 150	3 bottles c/w approx. 25 cm ³ each	35 strain gages	brush application	air drying at room temperature	max. 1 year	one-component solvent containing nitrile rubber
SG 250 transparent silicone rubber Order no.: 1-SG 250	– 70 ... + 250	tube with approx. 85 g	20 strain gages	tube application	air drying at room temperature	6 months	transparent one-component solvent free silicone rubber
PU 120 ¹⁾ polyurethane paint Order no.: 1-PU 120	– 40 ... + 120	3 bottles c/w approx. 30 ml each	250 strain gages	brush application	room temperature ... + 100°C	1 year	one-component solvent containing polyurethane paint
SL 450 transparent silicone resin Order no.: 1-SL 450	– 50 ... + 450	3 bottles c/w approx. 25 g each	90 strain gages	brush application	in temperature steps from 95°C ... 315°C	6 months	transparent solvent containing silicone resin

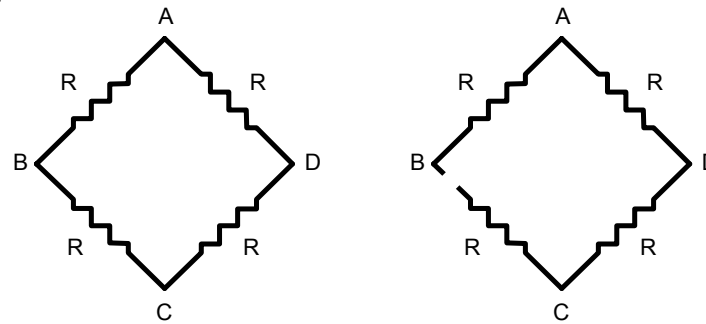
CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 6 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

6.3 – APLICAÇÃO DE SG

Verificação da qualidade da aplicação

Controle da ponte



Ponte fechada:

$$R_{AC} = R_{BD} = R_g ; \quad R_{AB} = R_{BC} = R_{CD} = R_{DA} = \frac{3}{4} R_g$$

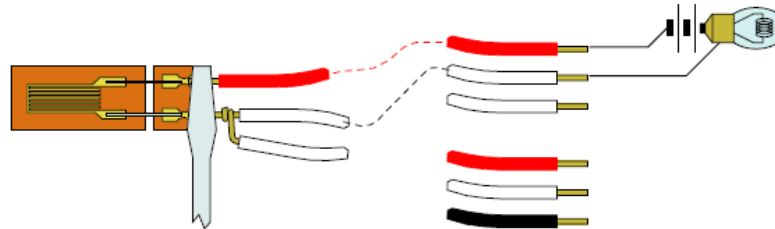
Ponte aberta:

Nas diagonais: $R_{AC} = R_{BD} = 2R_g$

Sobre o SG aberto: $R_{IJ} = 3R_g$

Sobre qualquer outro SG: $R_{IJ} = R_g$

Controle da fiação



CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 6 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

6.3 – APLICAÇÃO DE SG

Verificação da qualidade da aplicação

Após o controle da ponte com a verificação básica de resistência ôhmica de cada braço, os passos seguintes são:

- Ajuste do ponto de zero, por hardware ou software;
- Teste da borracha, comprimir levemente o SG por meio de uma borracha. Um sinal diferente de zero deve surgir. Tão logo a pressão seja aliviada o zero deve ser rapidamente atingido. Caso contrário problemas na colagem devem ter ocorrido. A aplicação está condenada, deve ser refeita.
- Finalização da aplicação com uso da proteção definitiva;
- Calibração do SG, para análise de tensões;
- Calibração do transdutor, se for o caso.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 6 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

6.3 – APLICAÇÃO DE SG

Exemplo



CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 6 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

6.3 – APLICAÇÃO DE SG

Exemplo de aplicação em equipamento de ensaio de pneus, instrumentado com vários sensores de carga, posição e deslocamento.



CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 6 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

6.4 – CASOS ESPECIAIS

Força de inércia

Casos de fortes acelerações, linear ou centrípeta.

A fiação fica fortemente solicitada e uma atenção especial deve ser dada a sua fixação. Recomendado o uso de fio de cobre rígido, esmaltado e colado integralmente sobre o componente sob ensaio.

Caso a instrumentação também seja submetida a fortes acelerações, verificar sua capacidade em suportar, em particular as conexões mecânicas.

História da Lei de Murphy.

Ensaio de capacidade do homem de suportar desacelerações.

Base aérea de Edwards, USAF, 1947 - 1948.

Sensor de aceleração sob flexão, ponte completa.

Versão 1, versão 2.

Major Edward Aloysius Murphy Jr., John Paul Stapp.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 6 – APLICAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

6.4 – CASOS ESPECIAIS

Ambiente agressivo:

Altas temperaturas

Materiais apropriados para o SG, fiação

Adesivos especiais, cerâmicos

SG com meia ponte para compensação automática

Fixação por solda a ponto, base metálica do SG

Local com grande umidade ou submerso

Proteção da umidade

Proteção mecânica

Grande interferência eletromagnética, EMI

SG especial para eliminar corrente induzida na grade.

Fiação especial, sempre par trançado.

Em casos extremos, empregar um cabo trançado em dois planos perpendiculares, Inter-8 Weave, ou fiação dentro de conduites metálicos.



Blindagem do local e da fiação, aço ou material de alta permeabilidade magnética, μ Metal, etc.

CURSO EXTENSOMETRIA

AULA 6 – INSTRUMENTAÇÃO DE EXTENSÔMETROS

6.5 – SELEÇÃO DO SG E DA INSTRUMENTAÇÃO RESUMO

Escolha do tipo de SG para uma dada aplicação

- Direções principais conhecidas ou não.
- Uniformidade do campo de tensões.
- Estabilidade desejada ao longo do tempo.
- Limitações de aquecimento da ponte.

Escolha das características da ponte

- Power spectrum do sinal a ser medido.
- Alimentação DC, AC, pulsada.
- Número de canais.
- Aquisição simultânea ou multiplexada.

Escolha da fiação, tabela AWG

Na fiação interna à Ponte de Wheatstone usar fio rígido com diâmetro compatível com o tamanho dos terminais dos SG. Usar o mínimo de solda.

A bitola da fiação externa deve ser escolhida de forma que os cabos tenham no máximo 1% da resistência elétrica do SG. De preferência muito menos. Usar cabo flexível.

Se existem campos magnéticos, obrigatoriamente deve-se usar par trançado.

BITOLA DE FIO - PADRÃO AWG

Bitola	Diâmetro	Diâmetro	Área	Resistência do fio, Ω / m			
AWG	Polegadas	mm	mm²	Cobre	Constantan	NiCr 80	NiCr 60
0000	0.460000	11.680	107.146	1.60911E-4	4.573192E-3	1.014875E-2	1.053888E-2
000	0.409600	10.400	84.9488	2.029574E-4	5.768176E-3	1.280064E-2	1.329270E-2
00	0.364800	9.266	67.4335	2.556743E-4	7.266422E-3	1.612552E-2	1.674540E-2
0	0.324900	8.252	53.4822	3.223689E-4	9.161925E-3	2.033200E-2	2.111356E-2
1	0.289300	7.348	42.4062	4.06568E-4	1.155492E-2	2.564249E-2	2.662819E-2
2	0.257600	6.543	33.6236	5.127643E-4	1.457308E-2	3.234034E-2	3.358351E-2
3	0.229400	5.827	26.6674	6.465192E-4	1.837448E-2	4.077635E-2	4.234381E-2
4	0.204300	5.189	21.1475	8.152752E-4	2.317063E-2	5.141988E-2	5.339647E-2
5	0.187900	4.620	16.7639	1.028461E-3	2.922949E-2	6.486561E-2	6.735906E-2
6	0.162000	4.115	13.2993	1.296379E-3	3.684390E-2	8.176337E-2	8.490638E-2
7	0.144300	3.665	10.5497	1.634269E-3	4.644695E-2	0.1030743	0.1070365
8	0.128500	3.264	8.36741	2.060494E-3	5.856052E-2	0.1299565	0.1349521
9	0.114400	2.906	6.63257	2.599443E-3	7.387781E-2	0.1639484	0.1702507
10	0.101900	2.588	5.26041	3.277502E-3	9.314866E-2	0.2067140	0.2146601
11	0.090740	2.305	4.17285	4.131708E-3	0.1174257	0.2605893	0.2706064
12	0.080810	2.053	3.31031	5.208272E-3	0.1480224	0.3284888	0.3411160
13	0.071960	1.828	2.62448	6.569301E-3	0.1867037	0.4143297	0.4302567
14	0.064080	1.628	2.08161	8.282523E-3	0.2353945	0.5223837	0.5424643
15	0.057070	1.450	1.65130	1.044084E-2	0.2967353	0.6585100	0.6838233
16	0.050820	1.291	1.30901	1.317101E-2	0.3743283	0.8307033	0.8626359
17	0.045260	1.150	1.03869	1.659878E-2	0.4717474	1.046894	1.087137
18	0.040300	1.024	0.82355	2.093493E-2	0.5949839	1.320379	1.371134
19	0.035890	0.9116	0.65267	2.641575E-2	0.7507521	1.666057	1.730101
20	0.031960	0.8118	0.51759	3.330991E-2	0.9466884	2.100875	2.181634
21	0.028460	0.7229	0.41044	4.200637E-2	1.193847	2.649366	2.751209
22	0.025350	0.6439	0.32563	5.294619E-2	1.504764	3.339347	3.467713
23	0.022570	0.5733	0.25814	6.678942E-2	1.898197	4.212448	4.374376
24	0.020100	0.5105	0.20468	8.423257E-2	2.393942	5.312597	5.516815
25	0.017900	0.4547	0.16238	0.1061748	3.017556	6.696510	6.953927
26	0.015840	0.4049	0.12876	0.1338986	3.805481	8.445062	8.769693
27	0.014200	0.3607	0.10218	0.1687249	4.795268	10.64158	11.05065
28	0.012640	0.3211	8.0978E-2	0.2129075	6.050964	13.42820	13.94438
29	0.011260	0.2860	6.4242E-2	0.2683734	7.627339	16.92647	17.57713
30	0.010030	0.2548	5.0990E-2	0.3381215	9.609623	21.32552	22.14528
31	0.008928	0.2268	4.0399E-2	0.4267618	12.12884	26.91611	27.95078
32	0.007950	0.2019	3.2015E-2	0.5385163	15.30497	33.96454	35.27015
33	0.007080	0.1796	2.5334E-2	0.6805482	19.34161	42.92258	44.57253
34	0.006305	0.1601	2.0131E-2	0.8564242	24.34011	54.01517	56.09154
35	0.005615	0.1426	1.5971E-2	1.079525	30.68076	68.08624	70.70350
36	0.005000	0.1270	1.2667E-2	1.361018	38.68100	85.84025	89.13998
37	0.004453	0.1131	1.0046E-2	1.716115	48.77306	108.2364	112.3970
38	0.003965	0.1007	7.9643E-3	2.164774	61.52424	136.5336	141.7820
39	0.003531	0.0897	6.3194E-3	2.728266	77.53902	172.0733	178.6879
40	0.003145	0.0799	5.0140E-3	3.438571	97.72635	216.8727	225.2094
41	0.002800	0.0711	3.9704E-3	4.342425	123.4144	273.8793	284.4073
42	0.002494	0.0633	3.1470E-3	5.478532	155.7033	345.5342	358.8167
43	0.002221	0.0564	2.4983E-3	6.901021	196.1313	435.2514	451.9826
44	0.001978	0.0502	1.9792E-3	8.710919	247.5698	549.4030	570.5222
45	0.001761	0.0447	1.5693E-3	10.98643	312.2411	692.9204	719.5565
46	0.001568	0.0398	1.2441E-3	13.85815	393.8575	874.0421	907.6405
47	0.001397	0.0355	9.8980E-4	17.41866	495.0493	1098.605	1140.836
48	0.001244	0.0316	7.8427E-4	21.98353	624.7856	1386.514	1439.812
49	0.001107	0.0281	6.2016E-4	27.8009	790.1190	1753.419	1820.821
50	0.000986	0.0251	4.9481E-4	34.84369	990.2794	2197.612	2282.089
Resistividade considerada, ρ Ω mm² / m				Cobre	Constantan	NiCr 80	NiCr 60
				0.0172 ₄₁	0.490	1.08 ₇₄	1.12 ₉₂

The Fastest Man on Earth

Why Everything You Know About Murphy's Law is Wrong

by Nick T. Spark

whatcangowrongwill@yahoo.com

www.Regulus-Missile.com and www.eyeballoverload.com

Los Angeles, California

Introduction



Photos of John Paul Stapp, Edward A. Murphy, Jr., and some of the other individuals involved in the birth of Murphy's Law, as chronicled in this article. Photos and materials in the collage courtesy of: David Hill, Edwards Air Force Base History Office; Raymond Puffer; Robert Murphy; and the collection of Nick Spark.

I have become the world's leading expert on Murphy's Law. No really, I'm serious. You doubtless have heard the Law: Whatever can go wrong, will go wrong. To some it is a profound statement of philosophy, a reminder that life can be defined just as much by its inherent challenges as anything else. To others however the Law is a pessimistic comment that underscores, albeit in more elegant terms, that shit happens.

Whatever you might think about Murphy's Law, one thing is certain: it is as ubiquitous an expression as there is in American English. Over the years it has been cited in thousands of articles, websites and news reports, been the subject of several books, appeared as the title of at least one bad Charles Bronson movie and a TV show, and inspired about a dozen zillion corollary Laws. Just about every time something goes wrong somewhere, the Law gets its two cents in. Fortunately my expertise owes very little to actual adversity — I'm not writing this from a hospital bed — and almost everything to research. Historical research. Which is to say I have become the expert on the origins of Murphy's Law. This happened by accident...and if I'd known what the consequences would be of sticking my nose into it — how I'd draw the wrath of Chuck Yeager, get caught in the middle of a nasty 20-year feud, and nearly wind up in a hospital bed — I probably wouldn't have bothered.

PART 1 - The Road to Murphy's Law

This all began a few months ago, after I showed an article I'd written for an aviation history magazine to my neighbor. The article concerned some goings on at Edwards, the famed Air Force flight test facility, in the 1950's. "You know," my neighbor said, "You'd probably be real interested in talking to my father, David Hill Sr. He worked at Edwards, on a bunch of rocket sled tests in the 1940's. In fact," he continued proudly, "he knew Murphy."

"Murphy?" I inquired, searching my memory for a test pilot of the same name. Yeager, Crossfield, Armstrong... It didn't ring a bell.



Figure 1. KEY PERSONNEL. The key participants in the Gee Whiz tests at Edwards Air Force Base, which gave birth to Murphy's Law. John Paul Stapp stands in the second row, center, wearing dark clothing. George Nichols is immediately to the right of Stapp. David Hill is in the front row on the left. (Note: Ed Murphy does not appear in this or any other known photo at Edwards, because he was there for only a couple of days. Photo: courtesy of Edwards Air Force Base (EAFB) History Office.

"You know, Murphy," he went on. "The guy who invented Murphy's Law."

I didn't say it, but I was absolutely skeptical. Who wouldn't be? One might as well claim to be friends with Kilroy, know the identity of Deepthroat, or the whereabouts of Amelia Earhart. The notion seemed outright laughable. Your father knew Murphy? Sure he did! If Murphy wasn't some imaginary Irish folk hero, then he was probably a gentle sage who drank a lot of Guinness and lived back in the 1700's. Needless to say I let the subject slide.

But a day or two later, I almost tripped over a slender book called *Murphy's Law and Other Reasons Why Things Go Wrong* that had been left on my doorstep. The book cited Murphy's Law and then listed literally hundreds of amusing corollaries. The extremely brief foreward to the volume included a letter written by an engineer named George Nichols. And this is where things got interesting. Nichols said he'd worked on a series of rocket sled tests at Edwards in the 1940's with a Colonel John Paul Stapp and that Murphy's Law emerged from these tests.

"The Law's namesake," Nichols wrote, "was Capt. Ed Murphy Jr., a development engineer... Frustrated with a strap transducer which was malfunctioning due to an error in wiring the strain gauge bridges caused him to remark — 'if there is any way to do it wrong, he will' — referring to the technician who had wired the bridges. I assigned Murphy's Law to the statement and the associated variations..."



Figure 2. THE FACE OF STAPP. These are the photographic frames that made John Paul Stapp famous. Printed in physics textbooks and shown in driver's education classes for a generation, they vividly illustrate the concept of G forces -- and also the courage of the Gee Whiz's lone human rider. Ironically, while Stapp and his work had a tremendous, if largely unappreciated, impact on the life of every American, it was Murphy and the Law that became household names. Photos courtesy of EAFB History Office.

That appeared straightforward enough, and piqued my interest. I subsequently did some research and I discovered to my surprise that the story of the origin of Murphy's Law was not something generally agreed upon. Accounts in fact varied wildly. Some sources gave the credit solely to Ed Murphy Jr., a man they praised for his wisdom, insight, and panache, but said almost nothing about. In other places, Nichols' letter appeared — often word for word — explaining how he had come up with "the statement." And at least a few writers suggested that Colonel Stapp, also known as "the Fastest Man on Earth," had invented the Law.

It made my mind race. What were the real facts? Exactly who was Capt. Ed Murphy? What on earth was the point of Stapp's rocket sled tests? And what the heck is a strap transducer? I decided I had to find out. How hard could it be? I thought. Murphy's Law might be something of an urban legend -- like the story about the guy who strapped rocket bottles to his car and accidentally launched himself into a mountainside — but thanks to my neighbor I had apparently stumbled upon a real, living, tangible link.



Figure 3. DAVID HILL. David Hill Sr., a project participant, photographed here in July 2002. Photo by the author.

The Rocket Sled

When I walked into David Hill's house, I immediately spotted ten or so photographs from the sled tests arranged on his dining room table. The sled itself is a primitive looking steel and aluminum car armed with four massive rocket bottles — yes, the same type that allegedly hurtled that crazy fool into that mountain — and in the photo it is shooting down a railroad track like a hoot owl out of Hell. Behind it trailed a twenty-foot long dagger of fire. "That's Captain Stapp," David Hill says, pointing to a fuzzy figure strapped to the sled. He points him out again, this time in a group photo. Stapp is a bespeckled,

smiling, somewhat pudgy man who doesn't remotely resemble the lean, tough astronaut or test pilot I'd expected. "And here's George Nichols," Hill continues, pointing to a dapper, white shirted fellow standing nearby. To his right, a very young David Hill squints in the bright sun. Is Murphy in the photo, I ask? "No," Hill answers. "I don't have any pictures of Murphy. He was only there with us a couple of days."

Although a bit set back by Parkinson's, 83-year-old Hill still has the rock solid mind of an engineer, and recalls events with startling clarity. In 1947, he'd accepted a job at Northrop Aircraft and been dispatched to Muroc (later renamed Edwards) to work on Project MX981. These tests were run by Capt. Stapp who, Hill says, wasn't just an Air Force officer. He was a medical doctor, a top-notch researcher, and a bit of a Renaissance man.

The goal of MX981 was to study "human deceleration." Simply put, the Air Force wanted to find out how many G's — a 'G' is the force of gravity acting on a body at sea level — a pilot could withstand in a crash. For many years, Hill says, it had been an established fact that the limit was 18 Gs. Every military aircraft design was predicated on that statistic, yet certain incidents during WWII suggested it might be wrong. If it was, then pilots were needlessly being put at risk.



Figure 4. OSCAR EIGHTBALL. Oscar Eightball is tucked in for a ride on the Gee Whiz. The dummies used in the tests were primitive, but proved invaluable in terms of "getting the bugs out" of the test sled. Later in his career, Stapp would help define specifications for test dummies, and supervise their apparently first-ever use in automobile crash tests. Photo: courtesy of David Hill Sr. Collection.

To obtain the required data, the Aero Medical Lab at Wright Field contracted with Northrop to build a decelerator. "It was a track, just standard railroad rail set in concrete, about a half-mile long," says David Hill, pointing to another photo. "It had been built originally to test launch German V-1 rockets during WWII." At one end of the track engineers installed a 50-foot long series of hydraulic brakes that looked like dinosaur teeth. The sled, nicknamed the "Gee Whiz," would hurtle down the track and hit them at near maximum velocity, upwards of 200 mph. Exerting millions of pounds of force, the brakes would bring the sled to a stop in less than a second. In that heart-stopping moment, the physical forces at work would be equivalent to those encountered in a plane crash.

While the brass assigned a 185-pound, absolutely fearless, incredibly tough, and altogether brainless anthropomorphic dummy — known as Oscar Eightball — to ride the Gee Whiz, David Hill remembers Stapp had other ideas. On his first day on site he announced that he intended to ride the sled so that he could experience the effects of deceleration first-hand. It was a statement that Hill and everyone else found shocking. "We had a lot of experts come out and look at our situation," he remembers. "And there was a person from M.I.T. who said, if anyone gets 18 Gs, they will break every bone in their body. That was kind of scary."

But the young doctor had his own theories about the tests and how they ought to be run, and his nearest direct superiors were over 1000 miles away. Stapp'd done his own calculations, using a slide rule and his knowledge of physics and human anatomy, and concluded that the 18 G limit was sheer nonsense. The true figure he felt might be twice that if not more. That might sound like heresy, but just a few months earlier someone else had proved all the experts wrong. Chuck Yeager, flying in the Bell X-1 rocket plane, broke the sound barrier in the same sky that sheltered the Gee Whiz track. Not only did he not turn to tapioca pudding or lose his ability to speak, as some had predicted, but he'd done it with nary a hitch. "The real barrier wasn't in the sky," Yeager would later write. "But in our knowledge and experience."

Exit Oscar Eightball, Enter John Paul Stapp

But if Stapp was a maverick, he was also a scientist and a methodical one at that. For several months Oscar Eightball rode the sled, and in the process several design flaws were detected and corrected. On Oscar's first trip, the primary and emergency brakes failed and the Gee Whiz shot off into the desert. On another test Oscar got loose at 200 mph and sailed 700 feet downrange, leaving his rubber face behind on the Whiz's metal windscreen. Clearly, some damnable forces were at work.

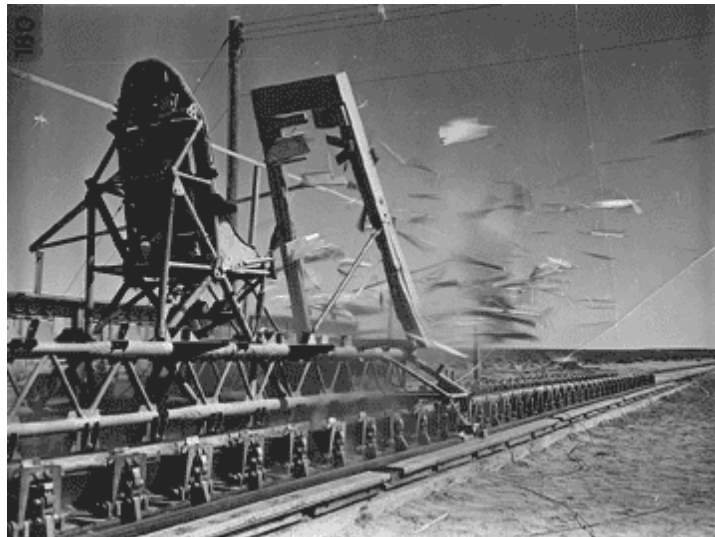


Figure 5. OSCAR AIRBORNE. Traveling at high velocity, Oscar Eightball shoots off the Gee Whiz — and right through a wooden windscreen -- on his way towards the Muroc dry lake. This “accident” was actually done intentionally to demonstrate the considerable physical forces at work on the sled track. Photo: courtesy of David Hill Collection.

Finally in December 1947 after 35 test runs, Stapp got strapped into the steel chariot and took a ride. Only one rocket bottle was fired, producing a mere 10 Gs of force. Stapp called the experience “exhilarating.” Slowly, patiently he increased the number of bottles and the stopping power of the brakes. The danger level grew with each passing test but Stapp was resolute, Hill says, even after suffering some bad injuries. And within a few months, Stapp had not only subjected himself to 18 Gs, but to nearly 35. That was a stunning figure, one that would forever change the design of airplanes and pilot restraints.

As fate would have it, David Hill was in charge of the telemetry gear that collected all of the test data. That proved to be challenging work, especially since most of the equipment was custom made or experimental. Almost all of it relied on balky vacuum tubes, which had a tendency to fail without warning, and radio and electronics technologies that were still in their infancy.

The Famous Incident

Which brings up, David Hill says at last, the famous incident. At one point an Air Force engineer named Captain Ed Murphy came out to Edwards. With him he brought four sensors, called strain gauges, which were intended to improve the

accuracy of G-force measurements. The way Hill tells it one of his assistants, either Ralph DeMarco or Jerry Hollabaugh, installed the gauges on the Gee Whiz's harness.

Later Stapp made a sled run with the new sensors and they failed to work. It turned out that the gauges had been accidentally installed backwards, producing a zero reading. "If you take these two over here and add them together," Hill explains matter-of-factly, "You get the correct amount of G-forces. But if you take these two and mount them together, one cancels the other out and you get zero."

It was a simple enough mistake, but Hill remembers that "Murphy was kind of miffed off. And that gave rise to his observation: 'If there's any way they can do it wrong, they will.'" Despite the fact that his people were apparently being blamed for the mistake, Hill shrugged it off. "I kind of chuckled and said, that's the way it goes," he sighs. "Nothing more could be done really."

Murphy's sour comment proceeded to make the rounds at the sled track. "When something goes wrong," Hill says, "The message is distributed to everyone in the program." The way the fat got chewed Murphy's words — 'if there's any way they can do it wrong, they will' — were transformed into a finer, more demonstrative "if anything can go wrong, it will." A legend had been hatched. But not yet born.

Just how did the Law get out into the world? Well, David Hill says, John Paul Stapp held his first-ever press conference at Edwards a few weeks after the incident. And he was attempting to explain his research in clinical terms when a reporter asked the obvious question: "How is it that no one has been severely injured — or worse — during your tests?" Stapp, who Hill says could be something of a showman, replied nonchalantly that, "we do all of our work in consideration of Murphy's Law." When the puzzled reporters asked for a clarification Stapp defined the Law and stated, as Hill puts it, "the idea that you had to think through all possibilities before doing a test" so as to avoid disaster.

According to Hill, that was a defining moment. Whether Stapp realized it or not, Murphy's Law neatly summed up the point of his experiments. They were, after all, dedicated to trying to find ways to prevent bad things — aircraft accidents — from becoming worse. As in fatal. But there was a more significant meaning that went to the very core of the mission of the engineer. From day one of the tests there had been an unacknowledged but standard experimental protocol. The test team constantly challenged each other to think up "what ifs" and to recognize the potential causes of disaster. If you could predict all the possible things that could go wrong, the thinking went, you could also find a way to prevent catastrophe. And save John Stapp's neck.

If anything can go wrong, it will. It was a concept that seized the cumulative imagination at the press conference. So when articles about the Gee Whiz showed up in print, Murphy's Law was often cited right along with Newton's Second.

"I didn't think here's some profound statement that been made that will shock the world," says Hill, expressing amazement that the remark gained such prominence. "It wasn't made as such. Of course it's true that if there's a right way to do something, there's generally a wrong way to do it also. And it's good to recognize the difference."

To my disappointment, Hill couldn't remember much more than that. He didn't really know Ed Murphy, he confessed. Regardless he was sure that Murphy had passed away, as had Stapp, DeMarco, and Hollabaugh. "If anyone will know who coined the Law it'll be George Nichols," he concluded. "If he's still alive, then he's the last one besides me who was there when it happened."

PART 2 - The “Careful Daredevil”

I tried to locate George Nichols, but didn't have any luck. While continuing the search, and beginning to write an article about the work of Dr. Stapp, I decided to put in a call to Edwards historian Ray Puffer. “You're writing an article about Stapp and Murphy's Law?” he sighs. I can literally hear his eyes rolling. As a public affairs officer, Puffer explains patiently, he's inundated with requests from all over the world to comment about it. It's a tiring, not to mention distracting, drill. “Just the other day some fellow called me from Oxford,” he says, “He's putting together a phrase dictionary and wanted me to verify the whole story. Verify it? How do you do that?!”

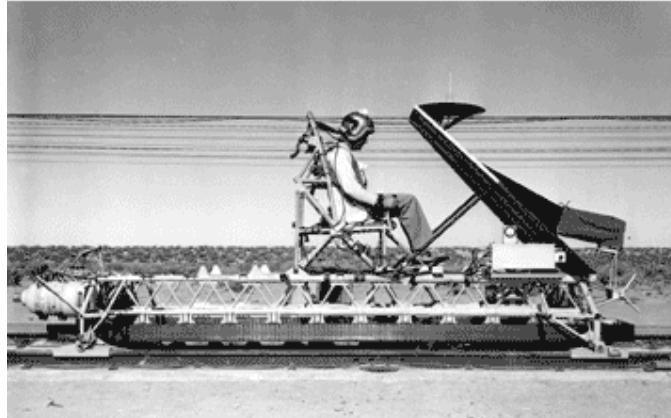


Figure 6. THE GEE WHIZ. The Gee Whiz, stripped down to a bare frame. This is the configuration it had for most of the tests. The forward windscreen protected the test subject, and also acted as a stand for a high speed camera. Mounted in the rear — notably without any shielding for Stapp in the event of a misfire — are a set of Aerojet rocket bottles. The circular device on the top of the sled is a telemetry antenna which, according to David Hill, worked “when it wanted to.” On the bottom of the sled, below the tubular frame, are visible one of the two long metal rails which interfaced with the brakes and the metal shoes which rode on the top of the railroad track. Photo: courtesy of EAFB History Office.

After some gentle cajoling, Ray agrees to meet so that I can go through the Stapp archive at Edwards. As a bonus, he offers to introduce me to Dr. Dana Kilanowski, a researcher who interviewed Stapp and is writing a book about him. “Who knows?” he says drolly, “Maybe you two'll get to the bottom of all this.”

The highlight of my visit to Edwards is a trip with Puffer and Kilanowski to see the remains of the Gee Whiz track. Sitting at the edge of the mighty planar lakebed, near where Space Shuttles land and secret aircraft are tested, the track lies forgotten amid the tumbleweeds. A surprising amount of it remains. The entire 2000-foot concrete foundation for the rails pokes out of the sand, and part of the brake stand is still extant. At the end of the track a set of aircraft wheels, once part of the emergency braking system, stand forlornly amid the sagebrush. “Edwards is such a big place,” Dr. Kilanowski muses, “that when they finished with a project they'd just abandon it and move to another site.”

Walking among the ruins, listening to the desert wind howl, it is hard to imagine what kind of man would willingly subject himself to the forces that Stapp endured. According to Kilanowski, the toll he took was staggering and his courage nothing short of monumental. The G-forces produced deep concussions, and the seat harness cracked his ribs and collarbone, and left him bruised and sometimes disoriented. Yet he never complained. “There's a famous story,” Kilanowski tells me. “Stapp broke his wrist on the sled twice. One time, being a doctor, he set the break himself on his way back to his office.”

Whether Stapp showed fear or not, the tests must have been terrifying. The sled track was like a giant gun barrel, and Stapp was riding the bullet. When I speak several months later to Air Force pilot Joseph Kittinger, who worked with Stapp later in his career on Project Manhigh — where he set a world record by parachuting from a balloon at 102,800 feet — he calls Stapp without hesitation the “bravest man I ever met.” It is a heck of a compliment coming from one of the most fearless men to walk the Earth. “He knew the effects of what he was getting himself into,” Kittinger says by way of explanation. “And he never hesitated.” Another rocket sled pioneer I speak to, Eli Beeding, confides that for him the stress of the tests became so bad that he would often spontaneously throw up before each run. Eventually, he had to quit because of it. Yet Stapp received far worse punishment, Beeding says, and faced scarier side-effects. Yet he never wavered. It is no wonder that around Edwards — a place known for its machismo — the soft-spoken, round-faced M.D. developed a reputation and a nickname: the “Careful Daredevil.”

Some of the injuries Stapp endured, Kilanowski notes, were of a variety seldom seen and more scary as a result. At accelerations above 18 G while travelling backwards (to minimize shock Stapp faced backwards in the initial tests), he began to experience “white outs” — a condition where blood pools in the back of the head, causing momentary loss of vision. In the forward position, Stapp suffered painful “red outs” as the blood surged forward in his eyes and broke vulnerable capillaries. Stapp once compared the sensation to having a tooth extracted. Only it lasted for hours.

“There’s only one reason he did it,” Kilanowski suggests. “His mission in life was to save lives. And he felt that this was one way he could do that.” Both of Stapp’s parents, she notes, were Baptist missionaries, and Stapp spent his childhood with them in far-off Brazil. Later in his life he’d mostly distanced himself from religion, but the missionary zeal remained.

Stapp in and on Seat Belts

And while saving the lives of aviators was important, Kilanowski says Stapp realized from the outset that there were other, perhaps even more important aspects to his research. His experiments proved that human beings, if properly restrained and protected, could survive an incredible impact. Yet the automobiles of the era didn’t have seatbelts, even as optional equipment. Few had any safety design features to speak of. In fact, quite the opposite. Many of them had ornamental, and very solid, steering wheels and dash boards that were utterly unforgiving in a crash, bumpers and frames that didn’t absorb any shock, and doors that tended to pop open in a collision. Without seatbelts, the occupants of a car involved in a crash were thrown around like rag dolls and often ejected. So when things went wrong, they often went very wrong. The carnage on American roads in the 40’s, 50’s and even 60’s was nothing short of hideous.

Improving automobile safety was something no one in the Air Force was interested in, but Stapp gradually made it his personal crusade. Each and every time he was interviewed about the Gee Whiz, Kilanowski notes, he made sure to steer the conversation towards the less glamorous subject of auto safety and the need for seatbelts. Gradually Stapp began to make a difference. He invited auto makers and university researchers to view his experiments, and started a pioneering series of conferences. He even managed to stage, at Air Force expense, the first ever series of auto crash tests using dummies. When the Pentagon protested, Stapp sent them some statistics he’d managed to dig up. They showed that more Air Force pilots died each year in car wrecks than in plane crashes.

While Stapp didn’t invent the three point auto seatbelt, he helped test and perfect it. Along with a host of other auto safety appliances. And while Ralph Nader took the spotlight when Lyndon Johnson signed the 1966 law that made seatbelts mandatory, Stapp was in the room. It was one of his real moments of glory.

“He saved a lot of lives,” says Kilanowski brightly. “In 1940 there were 25 million licensed drivers and 40,000 traffic deaths, and in they year 2000 there were 72 million drivers and 42,000 deaths. And I think that sums up his life. I can’t imagine how many

millions of lives that man's research saved over the years... He was a wonderful human being and a citizen of the world."

Stapp's Version, Sort of

But what about Murphy's Law? Kilanowski says she only spoke to Stapp about the subject in passing. "They had a test run one day," she tells me, "and Captain Murphy was here from Wright Field. And the cables were set wrong, backwards. And the sled test was run and they couldn't recover any of the data. And at the time I believe Stapp said something like, 'If anything can go wrong he'll do it.' A couple days later there was a press conference in Los Angeles and Stapp said something like, 'it was Murphy's Law — if anything can go wrong, it will go wrong.'"

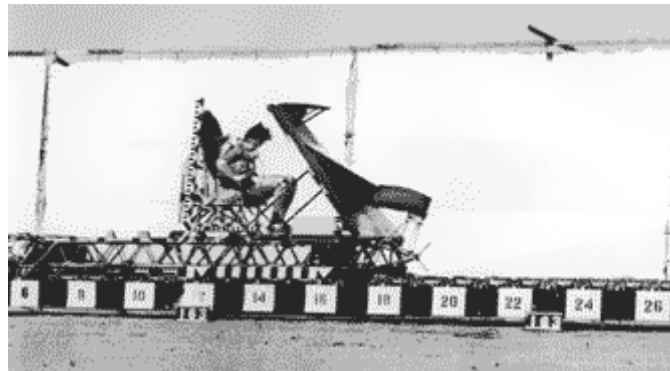


Figure 7. STAPP BRAKING. Stapp hits the brakes, hard. The white sheeting in the background obscures the brake stand, and was apparently intended to produce better high speed films of the tests. For whatever reason, Stapp decided not to wear a helmet for this run. Other details worth noting: he is wearing shorts and a t-shirt, and has a high-speed camera checkerboard painted on his knee. Photo: courtesy EAFB History Office.

I'm dismayed that Dana's version of the origin of the Law is so woefully incomplete. But I'm intrigued at the possibility that Stapp had coined the phrase. Does Kilanowski really believe he did? She nods her head affirmatively. "It's very much like him," she replies. "Stapp was a man for all seasons. He had a wonderful presence about him, and was always saying wonderful things." Funny, quotable things. One of her favorites is Stapp's Ironical Paradox, AKA Stapp's Law: the universal aptitude for ineptitude makes any human accomplishment an incredible miracle. "He always thought that was too wordy and too intellectual for the general public," she laughs. "But Murphy's Law was something everyone could relate to and is more catchy."

I mention that I've read that Murphy and/or Nichols came up with the Law. "Well, I have heard that Murphy claimed he invented Murphy's Law," Kilanowski says. "But Stapp is the one noted for his witticisms, his haikus, and his plays on words. He published a little book called Stapp's Almanac and another called For Your Moments of Inertia which have pages of jokes and sayings and wit. And," she adds, "We've never heard anything else from Murphy. So I cannot imagine that Murphy developed it." Then she throws in a kicker: "Why don't you ask George Nichols?" He is not only alive, she tells me, but living in nearby Pasadena.

"Another person you might consider talking to is General Yeager," says Kilanowski. "He knew Stapp. They were friends."

"That's right," adds Ray Puffer, who's been quietly listening in on our conversation. "In fact, I've heard that Dr. Stapp checked on Yeager's ribs, the day before he broke the sound barrier."

That's an interesting tidbit. Chuck Yeager is of course the most legendary figure at Edwards, and the biggest legend surrounding him is that he broke the sound barrier with a couple of cracked ribs. Was it really possible that Stapp examined Yeager, and told him he was okay to make that flight? If so, it was a new and exciting revelation, and one that had never made into the history books.

On my way out of Edwards I pick up a copy of Stapp's *For Your Moments of Inertia* at the base bookstore. By the time I get back to Los Angeles, I'm pretty much convinced by Kilanowski's argument that Stapp is the one who refined Murphy's statement into Law. The book doesn't cite the Law, but it is filled with wit. There are poems, limericks, and one-liners like, "Advice to Actors: Don't be a ham if you want to bring home the bacon," "Better a masochist than never been kissed," and "I'm as lonely as a cricket with arthritis."

Nichols on Stapp

When I call George Nichols and tell him I'd like to speak to him about Stapp and Murphy's Law, he is both excited and emotional. Stapp was one of his best friends, he explains, and he's always happy to talk about him. As for the origins of Murphy's Law, he says it's a sore spot. He'll talk about it but only if I agree to really pay attention. "You know, most people," he says with all seriousness, "have it all wrong."



Figure 8. STAPP DECELERATING. In this astonishing photo, actually a frame from a high speed motion picture camera, John Paul Stapp is caught in the teeth of a massive deceleration. One might have expected that a test pilot or an astronaut candidate would be riding the sled; instead there was Stapp, a mild mannered physician and diligent scientist with a wicked sense of humor. Photo: courtesy of David Hill Sr. Collection.

From the moment we begin speaking, George Nichols becomes teary-eyed. Stapp's death in 1999, at the age of 89, was expected but still hit him hard. Nichols couldn't attend because he was recovering from open heart surgery. "Stapp was a tremendous guy," Nichols says, and a real humanitarian. Stapp, he recounts, looked after the health of many of the dependents at Edwards who weren't entitled to Air Force medical care due to ridiculous red tape. He accomplished many things in similar fashion: off the books, against convention and military doctrine. He scrounged equipment for the Gee Whiz site like a corrupt supply sergeant, and defied his bosses at the Aero Med Lab in order to advance his research. For an officer, he had a heck of a rebel streak. He lists example after example, and concludes with this one: "When Chuck Yeager cracked his ribs before the supersonic flight, he went to see Stapp. Because he didn't believe the flight surgeons on base would permit him to fly." Stapp signed off on Yeager, Nichols continues, because he didn't believe the injury would hinder Yeager's ability to pilot the X-1. "Wow," I say. "Amazing."

While we're on the subject of injuries, Nichols begins speaking about what Stapp endured. The sled tests, he says, were an awful albatross around his friend's neck. Stapp didn't feel he would be able live with himself if another person were injured or killed in the course of his research, so he insisted on doing all the groundbreaking tests himself. As a result, he took a tremendous amount of punishment. Nichols repeats many of the incidents Kilanowski related — cracked ribs, broken wrists, concussions, and bloody cysts caused by flying grains of sand -- and adds one more. When the Gee Whiz tests were completed, Stapp rode on a much more sophisticated sled called the Sonic Wind at Holloman, New Mexico. On his twenty-ninth and what turned out to be final sled ride, Stapp reached a speed of 632 miles per hour -- actually faster than a speeding bullet --

and encountered 46.2 G's of force. In his pursuit of the knowledge of the physiological limits Stapp hadn't just pushed the envelope, he'd mailed it to the post office.

632 miles per hour broke the land speed record, making Stapp the fastest man on earth. And 46.2 G's was the most any human being had ever willingly experienced. Prior to the test Nichols had real doubts about whether it was actually survivable. It turned out it was, although Stapp paid a severe penalty. He suffered a complete red out. "His eyes had hemorrhaged and were completely filled with blood," Nichols remembers, his voice cracking. "It was horrible. Absolutely horrible." The image of Stapp's crimson visage haunts Nichols to this day. Yet while initially doctors feared Stapp had been blinded, they quickly confirmed that his retinas were intact. A day later, he could see again more or less normally. He'd have a trace image in his field of vision for the rest of his life.

Bravery was one thing. But the trait that really endeared Stapp to everyone, Nichols goes on, was his wit. At a dimly lit, sandy, brutal place like Edwards, a little laughter went a long way. "He had an extremely unique sense of humor," says Nichols, citing his puns, limericks and especially, laws. "Now at that time there weren't a lot of laws being used," Nichols muses, "Except for the standard ones in physics and science. Stapp started this whole business of laws," he says emphatically. "Now you've got millions of them."

Stapp's Ironical Paradox was one. Another was the 'Sunshine Law,' which meant that if the sun was shining over Edwards, there must be work to do. The entire team eventually got into the act, coming up with Laws. Nichols' Law for instance came into being after he witnessed a colleague attempt to jump across a dry concrete canal. The attempt failed. "So my law," Nichols says proudly, "is: 'If a proposed action has any unsatisfactory results, forget about it.'"

Which leads us to Murphy's Law. The reason most people get it wrong, Nichols indicates, is that they don't know how it was originally stated or what it meant. "It's supposed to be, 'If it can happen, it will'," says Nichols, "Not 'whatever can go wrong, will go wrong.'" The difference is a subtle one, yet the meaning is clear. One is a positive statement, indicating a belief that if one can predict the bad things that might happen, steps can be taken so that they can be avoided. The other version presents a much more somber, some might say fatalistic, view of reality.



Figure 9. STAPP ON THE WIND. John Paul Stapp on board the sled Sonic Wind, at Holloman, New Mexico. The 'Wind was the successor to the Gee Whiz, and was built with one goal in mind: to allow Stapp to reach a speed of Mach 1.0 in a deceleration test. Photo: courtesy of EAFB History Office.

Nichols on Murphy's Law

How did the Law come into being? Nichols relates a story similar to Hill's, only more detailed. Captain Edward A. Murphy Jr., he says, was a West Point-trained engineer who worked at the Wright Air Development Center. "That's a totally separate facility from the Aero Med Lab," he emphasizes. "He had nothing to do with our research." Nevertheless Murphy one day appeared at the Gee Whiz track. With him the interloper brought the strain gauge transducers -- a transducer is an electronic measuring device Nichols notes -- that Hill described. Only Nichols adds that they were actually of Murphy's own design.

The strain gauge transducers represented a potential solution to a problem with the Gee Whiz's G-force instrumentation. Questions had been raised about the accuracy of the accelerometers used on the sled. What Murphy hoped to do was to actually use the test subject, be it a dummy, chimpanzee or human being, to help obtain better data. The subject always wore a restraint system consisting of a heavy harness equipped with two tightening clamps. Murphy proposed placing strain gauge bridges in two positions on each clamp. When the sled came to a stop, the bending stress placed on the clamps would be measured, and from that an accurate measure of G-force could be produced.

Because he planned to return to Wright the very next day, Murphy implored Stapp and Nichols to have his transducers installed immediately. "And I said, well, we really ought to calibrate them," remembers Nichols. "But Stapp said, 'No, let's take a chance. I want to see how they work.' So I said okay, we'll put them on. So, we put the straps on and took a chance on what we thought the sensitivity was." A few hours later a test was run with a chimpanzee, and to Nichols' surprise the records showed no deflection from the gauges at all. "It was just a steady line like it was at zero," Nichols comments. Even if they'd been calibrated wrong, the transducers should have registered something. "And we guessed," Nichols continues, "that there was a problem with the way the strain gauges were wired up."

An examination revealed that there were two ways the strain gauge bridges could have been assembled. If wired one way -- the correct way -- they would measure bending stress. In the other direction they would still function, but the bending stress reading would be effectively cancelled out. In its place would be a measure of the strap tension, which in the case of determining G load was useless. "David Hill and Ralph DeMarco checked the wiring," Nichols continues, "and sure enough that's how they'd wired the bridges up." Backwards.

Yet unlike David Hill, Nichols insists the error had nothing to do with DeMarco, Hollabaugh or anyone else on the Northrop team. The gauges hadn't been installed wrong — they'd actually been assembled incorrectly at Wright Field and delivered as defective merchandise. Perhaps Murphy had designed the gauges incorrectly. Or perhaps he'd made his schematic in such a way that it was unclear, causing his assistant to wire them backwards — yet if the assistant had actually done that, then he'd truly had bad luck. On the face of it, the fellow would have had a 50% chance of wiring each gauge correctly. But he'd managed the hat trick, wiring all four wrong. Either way, Nichols figured, Murphy was at fault because he obviously hadn't tested the gauges prior to flying out to Edwards.

"When Murphy came out in the morning, and we told him what happened," remembers Nichols, "he was unhappy." But much to Nichols' surprise, Murphy almost spontaneously blamed the failure on his assistant at Wright. "If that guy has any way of making a mistake," Murphy exclaimed with disgust. "He will."

At the time Murphy's comment didn't seem like much of anything except a declaration of frustration and, in Nichols' view, an expression of extreme hubris. Certainly no one knew a eureka moment — a "Watson, come here!" or "The reaction is self-sustaining" — had just taken place. No one realized that the miswired transducers were like a singular destined apple, falling free of a branch and landing square on Newton's head, raising a bump and revealing a universal truth.

According to Nichols the failure was only a momentary setback — "the strap information wasn't that important anyway," he says — and regardless good data had been collected from other instruments. The Northrop team rewired the gauges, calibrated them, and did another test. This time Murphy's transducers worked perfectly, producing useable data. And from that point forward, Nichols notes, "we used them straight on" because they were a good addition to the telemetry package. But Murphy wasn't around to witness his devices' success. He'd returned to Wright Field and never visited the Gee Whiz track ever again.

Long after he'd departed however, Murphy's comment hung in the air like a lonely cloud over the ancient dry lake. Part of the reason was, no one was particularly happy with Murphy, least of all Nichols. The more he thought about the incident, the more it bothered him. He became all but convinced that Murphy, and not his assistant, was at fault. Murphy had "committed several cardinal sins" with respect to reliability engineering. He hadn't verified that the gauges had been assembled correctly, he hadn't bothered to test them, and he hadn't given Nichols any time to calibrate them. "If he had done any of those things," Nichols notes dryly, "He would have avoided the fiasco."

As it was Murphy's silly, maybe even slightly asinine comment made the rounds. "He really ticked off some team members by blaming the whole thing on his underling," Nichols says. "And we got to thinking as a group. You know? We've got a Murphy's Law in that. And then we started talking about what it should be. His statement was too long, and it really didn't fit into a Law. So we tried many different things and we finally came up with, 'If it can happen, it will happen.'"

So Murphy's Law was created, more or less spontaneously, by the entire Northrop test team under the supervision of Nichols. In one sense, it represented a bit of sweet revenge upon Ed Murphy. But George Nichols rapidly recognized it was far more than that. Murphy's Law was a wonderful pet phrase, an amusing quip that contained a universal truth. It proved a handy touchstone for Nichols' day to day work as project manager. "If it can happen, it will happen," he says. "So you've got to go through and ask yourself, if this part fails, does this system still work, does it still do the function it is supposed to do? What are the single points of failure? Murphy's Law established the drive to put redundancy in. And that's the heart of reliability engineering."

The Murky Propagation of Murphy's Law

Like David Hill, Nichols says Stapp is the person who popularized the Law, via a press conference at Edwards. A few weeks later it started showing up in articles and trade publication advertisements. By the mid-1970's, when Nichols heard that a writer named Arthur Bloch was working on a "Murphy's Law" book, the phrase was ubiquitous. Yet Nichols had realized that almost no one knew its origin. So he wrote a short letter of explanation, not realizing that it would become the forward to the book and the definitive word on the subject. If he had, he might have amplified his comments.

Nichols had heard a rumor that Murphy was working for Hughes Helicopter in Los Angeles, but didn't see any reason to contact him prior to the publication of the book. But when it appeared Nichols decided to put in a call to his colleague. "And I asked him if he had seen it," says Nichols. "And he said no, he'd heard about it. He wasn't really interested in it." Nichols was surprised, and his colleague's brusque response — annoyed was more like it — led him to question something quite basic. Up until that moment, he'd always assumed Ed Murphy knew that he was the Murphy. Now he became convinced that Ed hadn't a clue about it, and was completely ignorant of his legacy. "He didn't even know about Murphy's Law until Bloch published his book," Nichols says firmly. "And until I told him he was mentioned in it, he didn't even get a copy."

It's a peculiar part of an otherwise straightforward story. But that's just the beginning. Shortly after he'd contacted Murphy, Nichols explains, things began to go seriously awry. What should have been a nice gesture on his part produced the opposite response. Murphy called and "He just went ballistic," says Nichols. "And he made this horrible, vitriolic speech in which he said that he thought Stapp and I were taking advantage of him." Murphy claimed that "what he had said that morning was a paragraph about reliability, about the use of redundancy and so on..." and insisted that he had made up the Law himself. He also asserted that his comment that day had been intended all along as a philosophical statement about reliability and engineering. In short, he was attempting to stake a claim on the broad implications of the Law and its legacy.

A frustrated Nichols listened to Murphy carry on, respectfully disagreed, and tried to let it go at that. But Murphy wasn't satisfied. According to Nichols, he contacted a few reporters and tried to get his side of the story out in the press. He also set to work writing a short text that presented his version of events. Eventually he sent a copy to

Nichols, Stapp and for whatever reason Chuck Yeager to sign. "He wanted to put this on a plaque at West Point," Nichols recalls bitterly. "And Stapp and I talked about it, and I said this guy is trying to rewrite history. And Stapp said, 'I don't like that and I'm not going to support it.'"

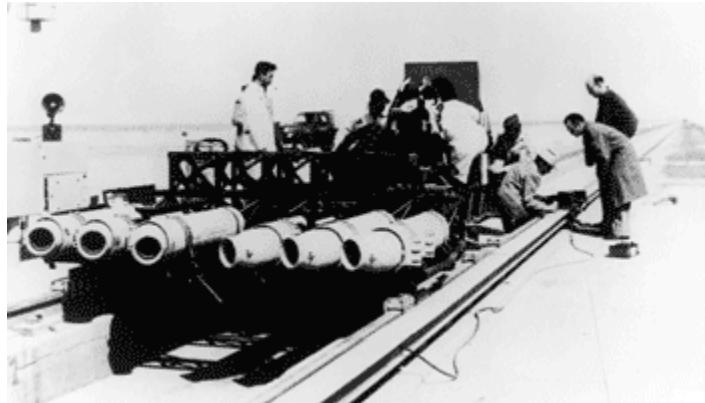


Figure 10. BUSINESS END. The business end of the Sonic Wind. A much more sophisticated sled than the Gee Whiz, it was designed to carry up to twelve massive rocket bottles and could travel into the supersonic range. Stapp called it a "wonderful test instrument." Photo: courtesy of EAFB History Office.

At that point, Nichols felt Murphy had crossed a line, but he was still willing to forgive him. But then Murphy's wife called Nichols and made some desultory statements about him and Stapp. She accused both of them of making money off of the Law, something Nichols says was "absurd." And she chastised them for not signing the letter for the plaque. Stapp had suffered so many concussions in his lifetime, she implied, that he obviously couldn't remember what had transpired. A short time later Murphy called and according to Nichols "he tore me apart. Then he tore Stapp apart. And he tried to take credit for (the Law)." That was the last straw. Nichols hung up the phone and never spoke to either Murphy or his wife again. Murphy died in 1989, Nichols notes, and that was the end of that. "It was very very intense," says Nichols sadly. "And it just ruined a normal friendship. I used to look back on some of this as a good memory..."

I'm relieved when Nichols reaches the end of the story. By now he's gotten himself pretty worked up, and in the back of my mind I've been remembering that he'd had heart bypass surgery. I can just picture it now, the paramedics and their defibrillators, and me trying to explain that this is all a result of Murphy's Law. Fortunately, Nichols rapidly collects himself, and starts talking about more positive things — for example about how he once used Murphy's Law as a case study in a Bible class.

In Search of Murphy

Driving home a little while later, I can't help but think how my opinion of John Paul Stapp has grown mightily while talking to Nichols. Yet at the same time, my vision of Murphy has been completely shattered. The person Nichols described was not a charming, silver tongued Irish rogue with a unique sense of humor and amazing insight, as I had wanted to believe. He was apparently a pompous, jealous toad, someone who might actually have been so dour as to believe that "whatever can go wrong, will go wrong."

At the same time, I'm not altogether surprised to hear that Murphy might have gone off the deep end, at least in the immediate aftermath of Bloch's book being published. To have a bestseller, not to mention that bad action movie and all those calendars, t-shirts, and bumper stickers sold with your name on them — and not to get a dime out of it! -- that would really be irritating.

Anyway, after talking to Nichols I feel I know a lot more about the Law. But I'm also keenly aware I've only heard one side of the story. What if Murphy really had come up with the Law, as some people claimed? And what if I trusted what Nichols said, but in reality he was the one modifying the truth? And all because Murphy simply wasn't around

to defend himself. An old saying kept coming to mind: History is told by the winners. There's a corollary to this that is even more fitting: History is told by the survivors.

I put in a call to West Point to see if they might be able to help me find any of Murphy's descendents. I don't make much progress but I do wind up with a copy of a page from the 1939 West Point yearbook. In it is a photograph of a dashing Edward Aloysius Murphy Jr. in full dress, and below that a picture of him tinkering with a gas-powered model airplane. "Our earliest memory of Murph," the Howitzer notes in a short tribute, "is of a plebe convulsed with laughter at the antics of the Beast Detail." That certainly seemed closer to what one might imagine about the Murphy — a man with a sense of humor. And, in that context and in hindsight, the next line of the tribute seemed eerily prescient: "Abounding with ideas, (he) sought new solutions for each problem, and he enjoyed nothing so much as an argument on his methods. Murf's originality amused and amazed us; his friendly grin won a place in our memory." It was a fascinating description, especially the part about Murphy's ingenuity and need to debate his methods. But what stayed with me was that last comment about his grin. Like the Cheshire cat's persistent smile...

PART 3 Catching Up With Murphy



Figure 11. STAPP RIDES THE WIND. The Sonic Wind, with Stapp aboard, hits the water brake on December 10, 1954. When Stapp came out the other side of this splash, George Nichols and the entire Northrop team breathed a huge sigh of relief. And although Stapp longed to do another test -- this time at Mach 1.0 -- cooler heads prevailed. It was fortunate they did. Just a short time later, while performing another test, the Sonic Wind left the track and was nearly destroyed. Photo: courtesy of EAFB History Office.

A week later, I make an interesting discovery. In the Los Angeles Times, there is a letter to the editor written a few weeks after John Stapp's death by a Mr. Robert Murphy. It references Stapp's obit and says, "Thank you for including a reference to 'Murphy's Law' and correctly attributing it to my father, Edward A. Murphy (1918-1989)."

The letter went on to say that the obit's description of the origin of the Law -- which pretty much matched Nichols' -- was incorrect. "It was not Murphy who 'rigged a harness incorrectly,'" wrote Robert Murphy. "It was a technician on his test team who will forever go nameless. The sensor harness mistake was the classic one of being absolutely wrong. Sensors intended to switch 'on' the instant the rocket sled test started were incorrectly connected to switch 'off'."

On and off, I wonder? Where did he come up with that? I'm a bit of a loss, and it crosses my mind that this Robert Murphy might be an imposter. But when I get in touch with him by phone, he quickly convinces me he really is the son of Edward. Robert explains that I really have to track down a particular issue of People magazine featuring his father, and a book by Lawrence Peter — the man behind the Peter Principle ("In a hierarchy every employee tends to rise to his level of incompetence") -- called Why Things Go Wrong. These two texts he says, present definitive versions of events from his father's perspective. When I've looked at those, he promises me, he'll meet me and we can chat.

I track down both texts. In the People article (dedicated to the "unsung sage of the screw-up") Murphy more or less described what Nichols had, although some of the details varied. He said there were six, not four, strain gauges used on the sled and that Stapp, not a chimpanzee, had been riding the sled at the time of the initial malfunction. He also emphasized that the failure of the gauges was a hugely expensive error, something Nichols had denied. Most significantly, Murphy said that after the error was revealed he'd said "If there's more than one way to do a job, and one of those ways will result in disaster, then somebody will do it that way." At that moment Murphy claimed a much-inspired John Stapp proclaimed "That... is Murphy's Law." I fully expect the Lawrence Peter book to repeat this account, but surprisingly it doesn't. Instead it gives credit for the Law to "George Nichols... who happened to be present when Murphy uttered these words... and dubbed the remark Murphy's Law."

Robert Murphy is a little less enthusiastic about talking to me than I am about talking to him, mainly because the subject of Murphy's Law -- well it turns out it gets tired after a few decades. It's not a blessing or a curse, Murphy explains, but inquiries from curious parties like me are not altogether infrequent. Yet at the same time even his closest friends don't believe him when he explains that he isn't just the son of a Murphy, but of the Murphy. I have to agree, that is a somewhat strange predicament.

Edward A. Murphy Jr. had been born in the Panama Canal Zone, Robert tells me. From the beginning he'd been groomed to be an Army man like his father, a goal Ed Jr. fulfilled when he was accepted into West Point. By then the clouds of conflict were gathering and shortly after he graduated, Murphy was swept up into the chaos of WWII. He knew how to fly planes, but his real talent lay in engineering. As a result he became a chief maintenance officer. He ended up stationed at various bomber bases on the Burma, India and Chinese front, flew over "the Hump," and fixed planes from Saigon to Mandalay.

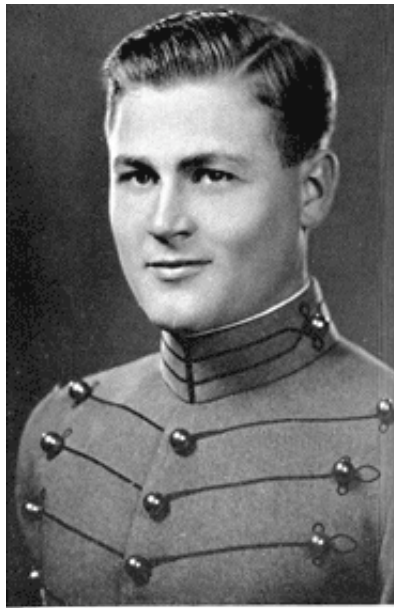
At war's end Murphy went to Wright Field, where Robert tells me he worked closely with John Stapp. He was an integral part of the test team. "My father would make frequent trips to Muroc," he says. "And come back and analyze the results." Later his father was transferred to Norton, and then to Holloman AFB. If he'd stayed in the Air Force at that point, Murphy speculates, his father would have supported Stapp's work on the Sonic Wind. "We lived right next door to Dr. Stapp at Holloman," he recalls. "In fact my sister and I used to raise mice and other animals for use in his lab." But the Murphy family's time in New Mexico was short lived. Murphy left the Air Force in 1953 for a better job in the civilian world, becoming a human factors engineer for Douglas Aircraft. He then worked for a series of companies before retiring from Hughes Helicopter, where he'd been a reliability engineer. "That was part of the application that he'd done all along," Robert concludes. "But it's kind of ironic that Murphy's Law would come from a reliability engineer."

Murphy on Murphy's Law

I ask Robert Murphy to share the story of the origins of the Law, as far as he knows it. What emerges is a slipshod version, and one I sense he isn't quite comfortable telling. There aren't "on" and "off" switches this time, but the details are sketchy. One interesting detail revolves around the idea that all the wires in the infamous transducer were identical, such that it was easy to connect them incorrectly. If some of them had been red, or some fatter than others, he says, then it would have been impossible to wire them backwards. "So the design was bad." When I ask him to expand on this a bit more, he politely declines, and refers me to the account in Lawrence Peter's book. In a sense I'm relieved when he does. The last thing I want to hear is another, completely different version of these hallowed events.

"Anyway," Robert Murphy goes on, "It is a reliability statement. If it can be done wrong, then somebody is going to do it wrong. That's one interpretation of Murphy's Law that's pretty close to what he meant. If you can design something and one way to assemble it or screw it in or whatever is going to make it fail," Robert sighs, "Then the design is wrong."

Robert says he is surprised and somewhat offended at the implication that his father mistreated George Nichols. It's nothing he knows anything about. "I don't think he ever claimed he'd actually come up with the Law," he says. "I mean, it's named after him." On the other hand, he suggests, Nichols might have his own reasons for raising a fuss -- to try to lay claim to the Law's immortal legacy. Robert's never heard of the incident with the West Point plaque either, and dismisses it as a non-event. "The whole idea of my father campaigning for a plaque is completely against character," he says firmly. "He never pushed the fact that he was the Murphy. In fact, I didn't realize it for years." Despite that comment and all that it might imply, Robert doesn't buy the idea that his father was wholly ignorant of the Law either, as Nichols claimed. "We lived next door to John Stapp at Holloman," he points out. "And I'm sure if he didn't know about it by then, Stapp must have mentioned it to him."



EDWARD ALOYSIUS MURPHY
BENICIA, CALIFORNIA
Senatorial

Figure 12. MURPHY AT WEST POINT. The West Point yearbook, the *Howitzer*, describes Edward A. Murphy as “abounding with ideas” and notes that “he enjoyed nothing so much as an argument on his methods.” The lower photo shows “Murph” tinkering with -- appropriately enough -- a model aircraft. Photo: courtesy of United States Military Academy, West Point.

I put the topic aside, since Robert clearly doesn’t know anything about the feud. So we start talking about related topics. Among other things, Bob tells me an amusing story about how he once got a job as a consequence of the Law. He was sent to Japan, where he worked as a technical writer, after an auto company there misprinted several hundred thousand owners’ manuals. They said “five speed shitting transmission” instead of shifting.

Law’s Murphy Meets Principle’s Peter

Before we part, Robert relates one more anecdote. “You know my father became good friends with Lawrence Peter? Right. Well, Peter was going to contact Parkinson. You know, Parkinson’s Law?” Robert says. ““Work expands to meet the time and money that is available.”” Having the three of them together would have been a heck of an historical moment. Unfortunately the meeting never took place because naturally, something came up.

Chuck Yeager’s Principle of Uncertainty

Three interesting things happen in weeks following my meeting with Robert Murphy. The first is that I get ahold of General Chuck Yeager. I’d sent him a letter way back when, never expecting he’ll actually contact me. When he does and I have him on the phone, I can hear my heart beating. I can’t believe I’m talking to the one, the only, true legend of Edwards, and that I’ll be able to include some of his reminiscences in my article.

Yeager has fond memories of Stapp and actually piloted an aircraft for him during some wind blast tests in the 1950’s. He also remembers inviting the doctor over to his home for dinner. The real motivation, he confesses, wasn’t good conversation. It was so that Stapp could give cursory medical examinations to his young sons, who weren’t permitted to visit the medical facilities at Edwards.

The conversation is flowing along, and the General is full of interesting yarns. But when I ask Yeager whether Stapp ever checked his ribs, prior to the first supersonic flight, he gets upset. “Who told you that?” he says forcefully. “That’s a bunch of crap!” I explain I have it from two different sources, although I’m not entirely certain they’re credible.

There is a brief pause on the phone, and then Yeager responds gruffly, "That's the way rumors get started, by these people...who weren't even there... Guys become, if you'll pardon my expression, sexual intellectuals. You know what the phrase is for that?" I have to admit no, I'm not familiar with the term. Sexual what? "Sexual intellectuals. They're fucking know-it-alls, that's what."

I'm almost afraid to ask my next question, which is whether Yeager is familiar with Murphy's Law, and knows that it came out of Stapp's work. "Well," Yeager says in a clipped voice. "I'm familiar with it. But I don't associate that with Dr. Stapp." There is another brief silence, and then he cautions me, "Look, what you're getting into here is like a Pandora's Box. Goddamn it, that's the same kind of crap...you get out of guys who were not involved and came in many years after. It's just like Tom Brokaw's book if you'll pardon the analogy here, about the best of the breed or something like that. Well, every guy who wrote his story about World War II did it fifty years after it happened."

"I'm a victim of the same damn thing," Yeager says, a bit less vitriolic. "I tell it the way I remember it, and that's not the way it happened. I go back and I read a report that I did 55 years ago and I say, hmm, I'd better tell that story a little bit different. Well, that's human nature," he says reflectively. "You tell it the way you believe it and that's not necessarily the way that it happened. There's nothing more true than that." He laughs and our conversation is at an end.

PART 4 - The Voice of Murphy

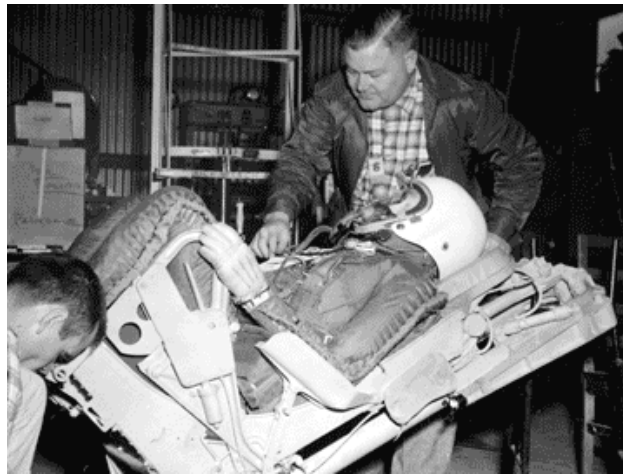


Figure 13: MURPHY AND AN EJECTION SEAT. Edward A. Murphy during escape system / ejection seat tests for North American Aviation in 1957. While Murphy labored in relative obscurity, the Law that bears his name became well known throughout the world. While his contribution to the Gee Whiz tests was fairly minor, Murphy's name will forever remain intertwined with those of Stapp and Nichols. Photo: courtesy of Robert Murphy.

Despite how badly my interview with Yeager concluded, I feel strangely relieved. I don't feel nearly so bad that I've failed to find a definitive answer about the origins of Murphy's Law. Yeager's right: there is no definitive truth. History, as the old saying goes, is nothing more than a pack of lies that everyone agrees are true.

The second thing that transpired was that I unexpectedly received several emails from Robert Murphy. In one he wrote that he wanted to clarify that his father passed away in 1990, not 1989 as he'd written in his letter to the editor. In another he wrote that he'd found a note on Los Angeles West Point Society stationery asking "if they could make a plaque about Murphy's Law for possible submission to the Academy. In other words," he continued, "this was not something my father was campaigning for. As I told you, self promotion was completely foreign to my Father..." In the same email Robert cited the comments I made at our meeting and noted that in his view "George Nichols is just an angry old man who regrets that the Law was not named after him, nothing more. He is a self-tainted source."

And then Robert wrote an email containing some exciting news. He'd been going through some things — I'd asked him to please find a photo of his father — and he'd come across a cassette tape of a radio interview about the Law. He presents it, and a photo of his father working on some rocket sled components, to me at a subsequent meeting.

The cassette tape is unmarked, and there is no spoken introduction whatsoever on the recording. I guess it might be the CBC, or NPR, and probably dates from the time of the People article, early 1980's. It's as close as I'm going to get to interviewing Ed Murphy, and of course I can't wait to hear it.

"Yes, Virginia," says the nameless commentator broadly, "there really is a Murphy. Ed Murphy, who we've got on the phone today..."

Ed Murphy's voice is serious, deliberate and humorless. Absolutely appropriate, I decide, for a career engineer. Asked to tell his version of the Murphy's Law story he goes into the kind of excruciating detail you'd expect from someone obsessed with precision. It leaves the interviewer, who apparently believed he was going to interview a slick, witty personality, completely flummoxed.

The senior Murphy said clearly in the interview that, as Nichols and Hill claimed, he wasn't part of the Gee Whiz team. He'd only been to Edwards once during Stapp's tests. He was working at Wright Field he recalled, on a project similar to Stapp's but which involved the use of a centrifuge. He'd designed some innovative electronic measuring equipment for the centrifuge, and when John Stapp heard about that, he called and asked if Murphy'd design some similar components for the Whiz. Murphy'd leapt at the chance, he said, because he admired Stapp and the groundbreaking work he was doing.

According to Murphy, he sent his equipment out to Edwards and it worked well for a few tests. But then something went wrong. Stapp called him to say that he'd "risked his neck riding on that darn sled" and the instruments had produced no data. "So I got on the next airplane to Muroc and had a meeting with him," Murphy explained. "And I said all right, let's see the accelerometers." An examination revealed to Murphy that — like Hill and Nichols said — "they had put the strain gauges on the transducers ninety degrees off."

Yet contrary to what Nichols said about Murphy not taking the blame for the trouble, Murphy said in the interview that he felt — to a certain degree — it was his fault. "I had made very accurate drawings of the thing for them, and discussed it with the people who were going to make them... but I hadn't covered everything," he sighed. "I didn't tell them that they had positively to orient them in only one direction. So I guess about that time I said, 'Well, I really have made a terrible mistake here, I didn't cover every possibility.' And about that time, Major Stapp says, 'Well, that's a good candidate for Murphy's Law'. I thought he was going to court martial me," Murphy noted dryly. "But that's all he said." When a confused Murphy wound up the courage to ask Stapp what he meant by a Murphy's Law, Stapp reeled off a host of other Laws, and said smartly that "from now on we're going to have things done according to Murphy's Law."

"And that," Ed Murphy concluded, "is about the way I think it happened."

This has been literally a five minute explanation, full of confusing technical information that would puzzle a rocket scientist. And while reciting the facts, Murphy seemingly didn't bother to state his own Law, and didn't make a single droll comment. So when the interviewer finally gets a word in edgewise, he doesn't know what to say except that "There is now a new Murphy's Law and this is it: you ask Captain Edward Aloysius Murphy a question and by God you get an answer!"

Then the interviewer tries to pin Murphy down. "Now most people," he says, "think that Murphy's Law goes like this: if anything can go wrong, it will. Is that right?"

"Well," Murphy replied, "I wouldn't say it's wrong."

"But how did you say it originally?" the interviewer teased.

"About that way. But I wouldn't say that's exactly the words," Murphy retorted. "I don't remember. It happened thirty five years ago, you know."

"Okay," the interviewer conceded. "But tell me the truth. Are you tired of being asked about it?"

"No," said Ed Murphy, just before signing off. "I enjoy it. I make a lot of friends that way. Everybody likes to think, that they have discovered a wonderful thing ... when they hear Murphy's Law for the first time."

Murphy's Law Applies to Murphy's Law

It's true: Murphy's Law is a wonderful thing and something which, many centuries down the line, will probably still be quoted with regularity. It is a universal truth, a highly reliable precept, and applicable to almost any situation. My own included. Where the story of the origins of the Law is concerned, I couldn't possibly have hoped to get it right. At least that's the lesson I'm forced to draw. If Murphy's Law can be seen in some

respects as a statement about entropy, human frailty or fallibility, then the contradictory story of its origins is annoying but also altogether apropos.



Figure 14. THE TRACK TODAY. A contemporary view of the Gee Whiz track at Edwards North Base. On this desolate stretch of desert history was made, and rockets roared and brakes screamed. Now, all is quiet. While much of the track has receded into the desert, a surprising amount of it remains. This photograph shows the brake stand area, which is about two-thirds of the way down the track. Photo by the author.

Indeed, when I think back on the “facts” I’ve managed to gather, all I can do is smirk. Few stand up to scrutiny. Nichols might have written in Bloch’s book that he coined the term “Murphy’s Law”... Yet during our interview he described it as more of a group effort. Murphy claimed in *People* and in his radio interview that Stapp named the Law, but apparently told Lawrence Peter that Nichols had done it. And while Nichols had claimed that Murphy had tried to usurp the Law, I couldn’t find any direct evidence of that. Just as I couldn’t find any evidence, despite what Kilanowski believed, that Stapp had ever claimed he’d coined it.

In similar fashion, David Hill told me the words Murphy uttered after the failure were “If there’s any way they can do it wrong, they will.” Whereas Nichols claimed it was “If there’s any way he can do it wrong, he will.” Yet when Murphy told the story to Peters, he claimed he’d said, “If there’s more than one way to do a job, and one of those ways will end in disaster, then somebody will do it that way...” He’d told the radio interviewer something entirely different (“I really have made a terrible mistake here, I didn’t cover every possibility”) and when pressed, he said he couldn’t remember exactly what he’d said.

I could go on. While Ed Murphy blamed himself for the mistake, Hill blamed DeMarco and/or Hollobaugh, and Nichols blamed Murphy’s assistant at Wright Field and/or Murphy -- although for different reasons than Murphy did! While Nichols said there were four strain gauges, and that their failure wasn’t a big deal, and that a chimp was involved, Murphy said there were six gauges and that the failure was an extremely costly mistake which occurred while Stapp rode the sled. Similarly, Murphy said he wasn’t there when the transducers initially failed, but Nichols and Hill said he was. Robert Murphy’d once thought the problem lay with “On” and “Off” switches, Kilanowski believed Stapp said Murphy’s line, and Ray Puffer and George Nichols thought Stapp’d examined Yeager’s ribs... You get the point. It all depends whose story you want to believe.

Whatever Can Go Wrong

There are at least — some undeniable facts. No matter who was at fault or who named the expression, the Law was named in honor of Ed Murphy, that’s for sure. And Stapp was the person who popularized it, no question about that. In fact without Stapp’s

showmanship at that fateful press conference, without his Promethean effort at contextualizing it and showing the world it was a universal truth, the Law probably would have vanished into the ether.

It's a notion I think about when the third thing — remember I said three things happened to me after I met Robert Murphy? — happens. I'm driving down the road at the speed limit, and I idly change lanes. Everything looks all clear, but suddenly my car is hit from behind with terrific force and goes spinning all the way across the street into the curb. Later, reconstructing events, I realize that the other driver, who was speeding, changed lanes to pass me at the exact same time I changed lanes. There was seemingly no way I could have seen him, and he was travelling too fast to stop or avoid hitting me. Of course I can't shake the thought: whatever can go wrong...

My car is nearly totaled — the rear crumple zone is completely compressed — but because of that and my shoulder harness seatbelt I walk away uninjured. It's a miracle really. And as I sit on the curb and wait for the police to arrive, I can't help but think about what Kilanowski told me about John Paul Stapp's steadfast, tireless efforts in the cause of auto safety. He might not have invented Murphy's Law, achieved "household word" fame or semantic immortality, but Stapp's contributions are real and remain with us in the present day.

In that sense, Stapp is the true hero of the Law. He's a ghost in the machine of every modern airplane and automobile, making sure that when things go wrong — really wrong — they don't become much worse. So, sitting there on the curb, I say a silent thank-you to the man who risked his own life in an effort to save thousands of others. My own included. John Paul Stapp was a courageous man, a great man I think, and his legacy continues to grow with each passing day.



Figure 15. MURPHY'S RESTING PLACE. Today Edward A. Murphy rests quietly in a veteran's cemetery. Whether or not it was he who he coined the Law, and whether it was named in his honor or out of spite, the amazingly adaptable Murphy's Law endures, and its appeal shows no signs of abating. Photo by the author.

Nick Spark is a writer and documentary filmmaker. He lives in Los Angeles.

© Copyright 2003 Nick T. Spark.

HotAIR web site © Copyright 2003 [Annals of Improbable Research \(AIR\)](http://www.improbable.com/airchives/paperair/volume9/v9i5/murphy/murphy1.html)

<http://www.improbable.com/airchives/paperair/volume9/v9i5/murphy/murphy1.html>